LE SCIENZE
edizione italiana di SCIENTIFIC AMERICAN

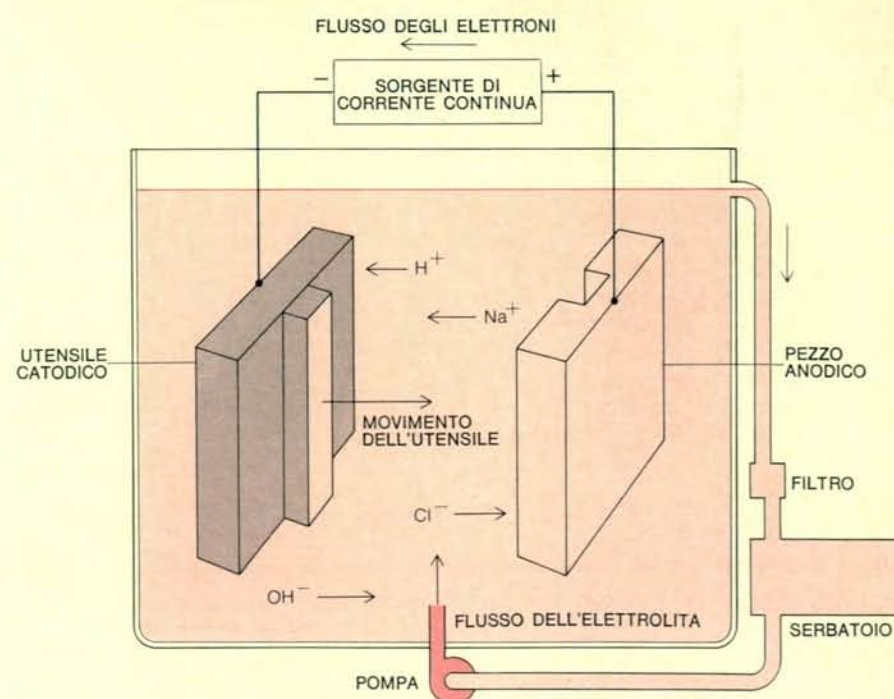
numero 68
aprile 1974
anno VII
volume XII

La lavorazione elettrochimica dei metalli

Le leghe più dure sono difficili da tagliare in forme complesse con gli utensili convenzionali. Si riesce tuttavia a lavorarle a specchio in una cella elettrolitica dove il metallo funge da anodo e l'utensile da catodo

di James P. Hoare e Mitchell A. LaBoda

L'approccio convenzionale alla lavorazione dei metalli secondo forme particolari è quello di utilizzare un utensile costruito con un materiale piú duro e di impiegarlo per tagliare o scavare il metallo piú tenero che costituisce il pezzo da lavorare. Con questo tipo di approccio tuttavia si incontrano gravi difficoltà quando il pezzo da lavorare è costituito da una lega di elevata resistenza, per il semplice fatto che può risultare impossibile reperire un materiale da utensile abbastanza duro per compiere il lavoro. Si possono impiegare a questo punto varie tecniche di molatura, che si basano sull'azione di un utensile abrasivo ruotante, ma esse sono assai lente e la varietà di forme che si possono ottenere in questo modo è limitata. Un nuovo metodo assai promettente per la lavorazione di materiali estremamente duri è costituito dalla cosiddetta lavorazione elettrochimica.

La lavorazione elettrochimica è fondamentalmente un processo di corrosione controllata. Tutta l'operazione si basa sull'impiego dell'elettricità per provocare delle reazioni chimiche. Esse avvengono in una cella elettrolitica, la quale contiene un liquido conduttore di elettricità (l'elettrolita) che viene messo a contatto con due metalli conduttori (gli elettrodi) collegati attraverso un circuito esterno (*si veda la figura in questa pagina*). La corrente che scorre tra gli elettrodi attraverso il circuito esterno viene trasportata dagli elettroni, mentre la corrente che scorre attraverso l'elettrolita viene trasportata dagli ioni, ovvero dagli atomi che hanno acquisito una carica negativa o positiva attraverso il guadagno o la perdita di elettroni. L'elettrodo che trasporta gli elettroni dall'elettrolita verso il circuito esterno è l'anodo,

Una cella elettrolitica per la lavorazione elettrochimica è illustrata in questa figura. L'utensile formatore, che costituisce il catodo, e il pezzo che deve essere lavorato, cioè l'anodo, sono immersi in una soluzione elettrolitica. Il catodo e l'anodo sono collegati a una sorgente di corrente continua e l'elettrolita viene pompato con forza fra di essi mentre uno dei due elettrodi, in questo caso il catodo, viene spostato in direzione dell'altro. Il movimento degli elettroni che si verifica fra gli elettrodi, nonché quello degli ioni nell'elettrolita provoca l'asportazione dei singoli atomi dall'anodo seguendo lo schema stabilito dalla forma del catodo. In una cella effettivamente funzionante gli elettrodi dovrebbero stare a pochi centesimi di millimetro di distanza l'uno dall'altro.

mentre quello che trasporta gli elettroni verso l'elettrolita è il catodo. Le reazioni chimiche fondamentali avvengono alla superficie degli elettrodi e sono provocate dal trasferimento degli elettroni che si verifica fra elettrodi e ioni.

Ciò che avviene nel processo di lavorazione elettrochimica è la rimozione atomo per atomo del metallo attraverso la dissoluzione anodica. Il pezzo di metallo che deve essere lavorato costituisce l'anodo e l'attrezzo metallico che dà luogo alla forma definitiva richiesta costituisce il catodo. Essi sono collegati a una sorgente di corrente continua a bassa tensione. Quindi un potente elettrolita viene pompato fra i due elettrodi. Senza che ci sia alcun contatto fisico fra l'attrezzo e il pezzo in lavorazione, non appena la corrente inizia a scorrere fra gli elettrodi, parte del metallo viene rimosso dal pezzo da lavorare secondo uno schema stabilito dalla forma dell'attrezzo. La velocità con la quale viene rimosso il metallo non è minimamente influenzata dalla durezza del pezzo. Per di piú, il procedimento non causa indurimento da lavorazione né sforzi indotti nella superficie metallica lavorata, fenomeni che costituiscono entrambi gravi problemi nel caso della lavorazione convenzionale.

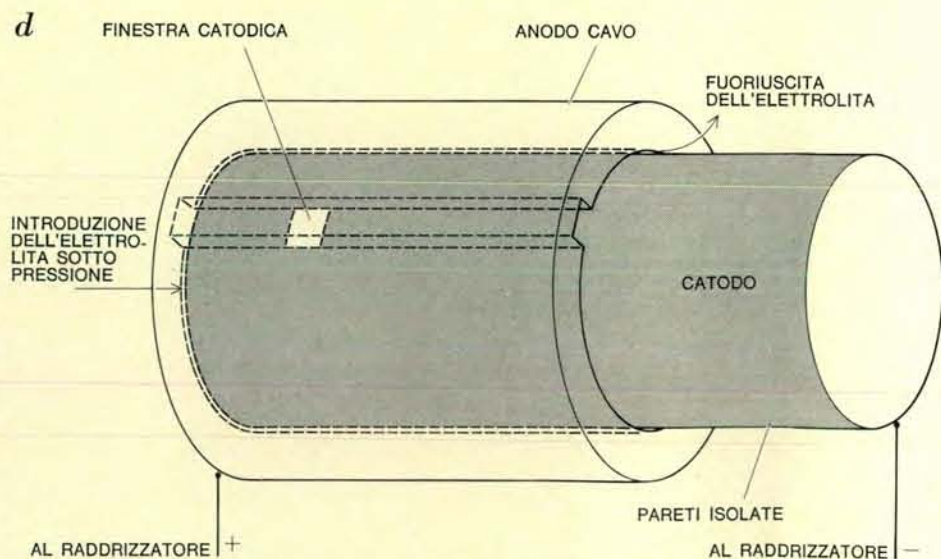
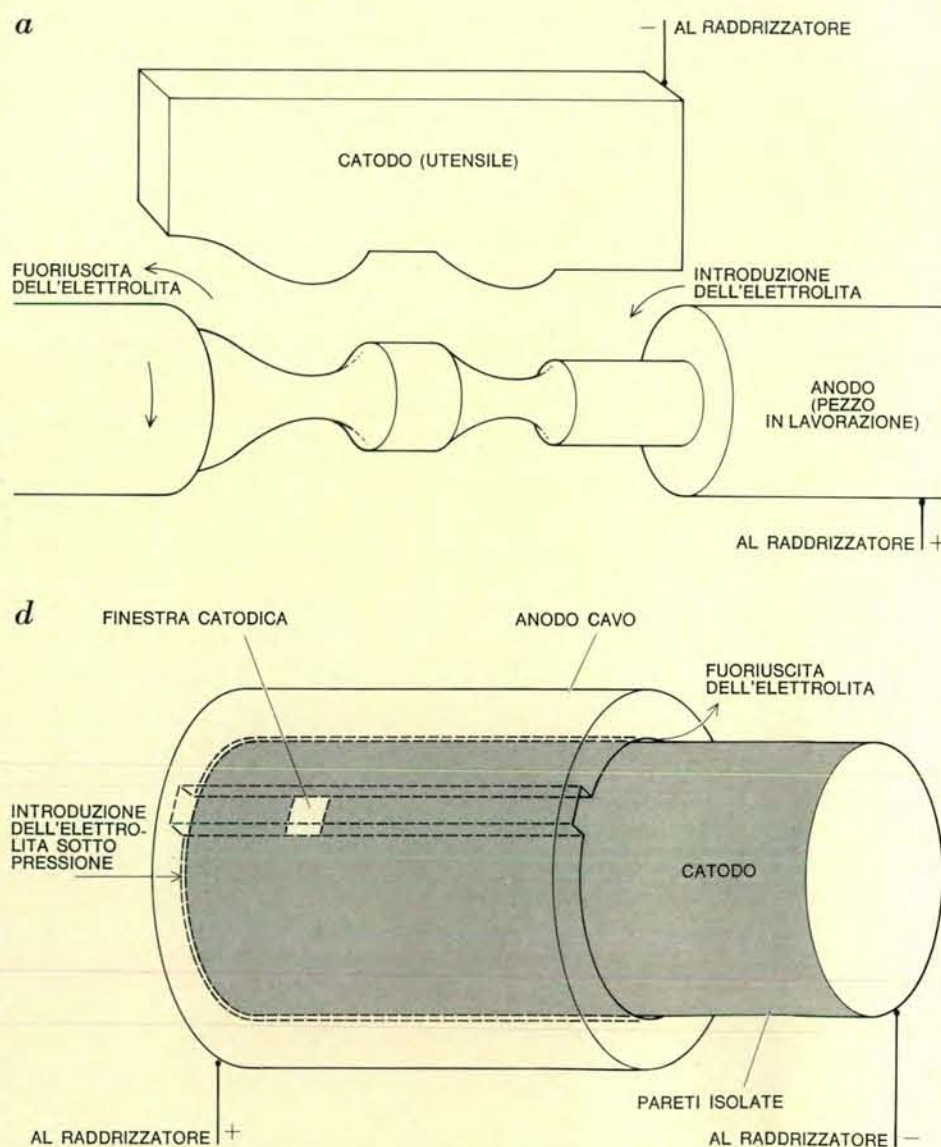
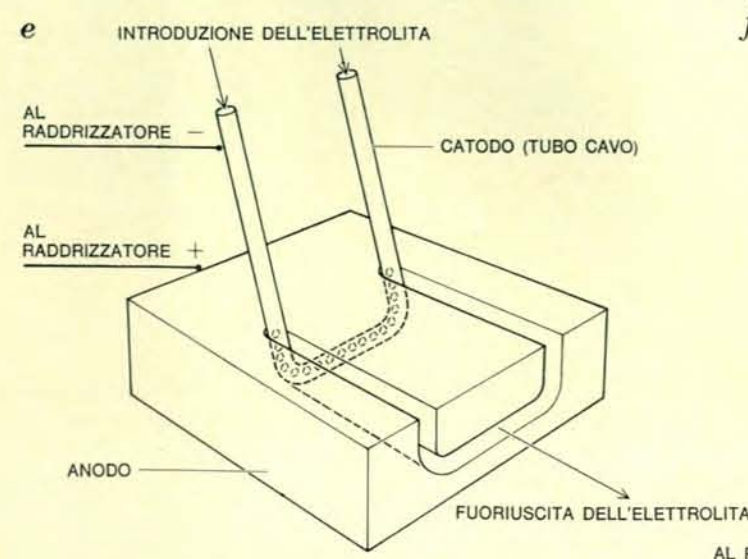
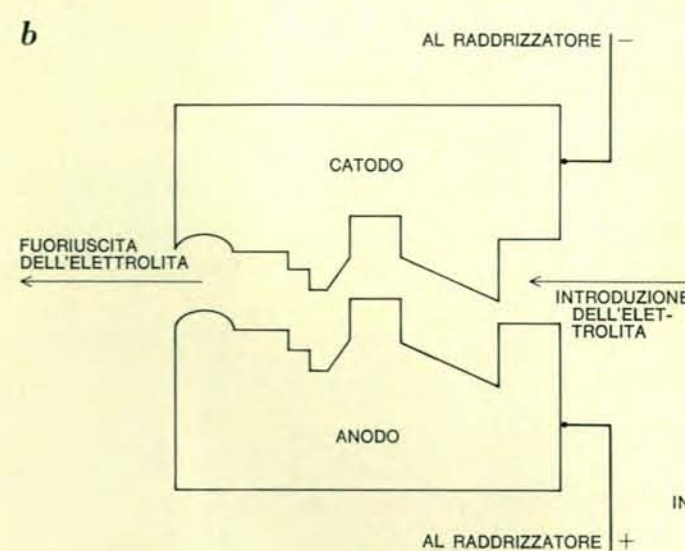
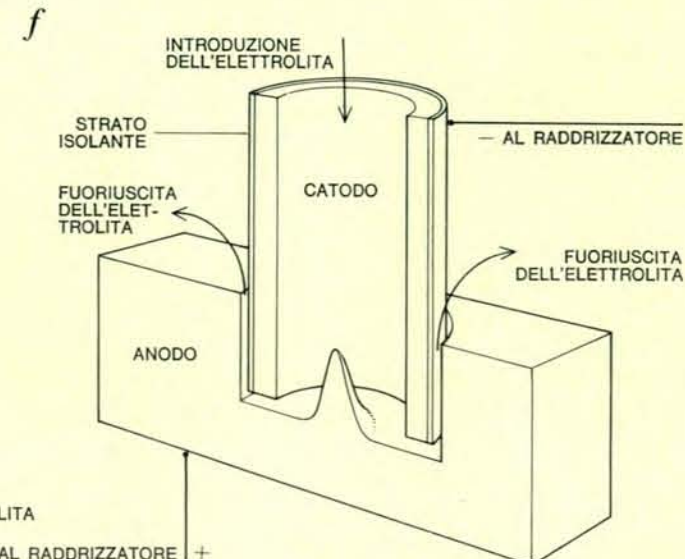
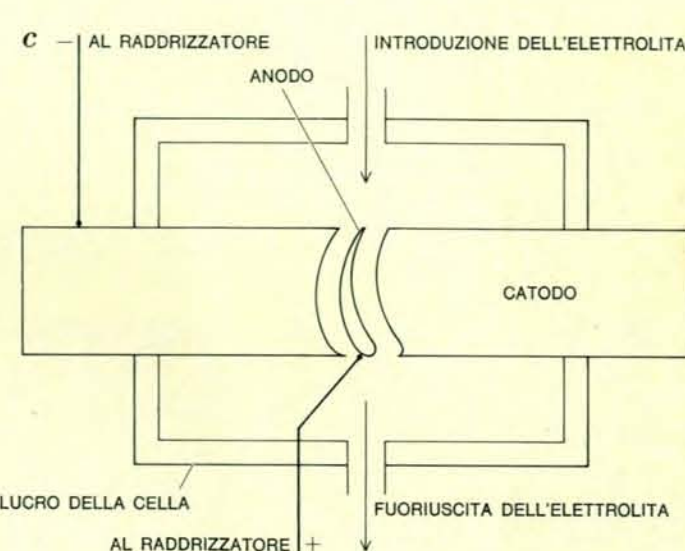
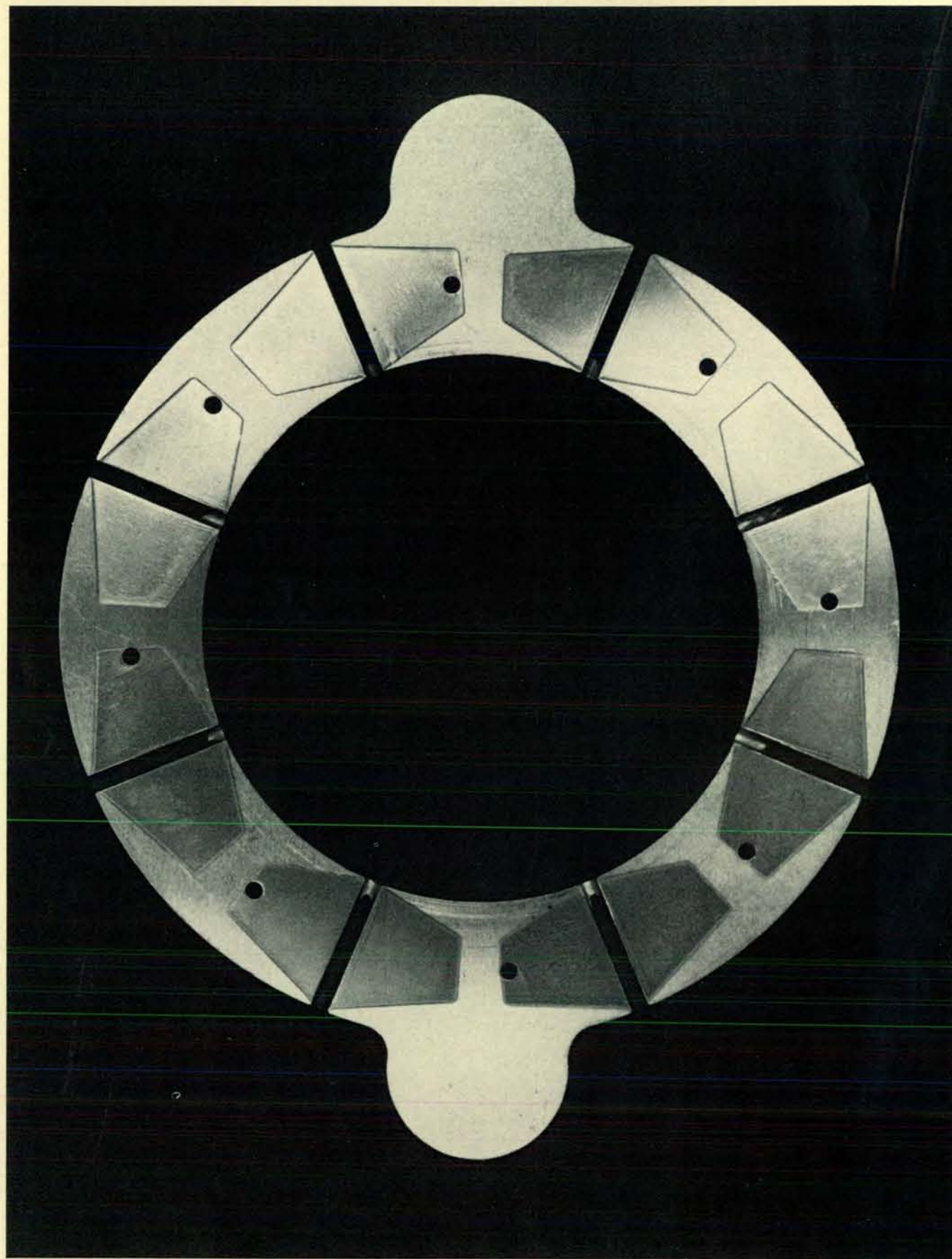
Queste proprietà della lavorazione elettrochimica le conferiscono un vantaggio incomparabile rispetto ai metodi convenzionali per la lavorazione di tutti i tipi di metalli usati comunemente nell'industria aeronautica e aerospaziale, e particolarmente delle leghe ad alta resistenza progettate per lavorare ad alta temperatura. Un ulteriore vantaggio è costituito dal fatto che con un catodo accuratamente progettato il processo può dar luogo a forme assai complesse che sono praticamente impossibili da ottenere per mezzo della molatura. Un esempio può essere il taglio e la finitura di un foro quadro e cieco (un foro che non passa da una parte all'altra del pezzo) in un blocco di acciaio completamente temperato. La lavorazione elettrochimica è in grado di ottenere non solo un fondo piatto ma anche superfici di lavorazione eccezionalmente liscie (in media 0,15 micron per la rugosità da picco a valle) senza graffi, rughe o solchi.

Il tempo di lavorazione risulta spesso notevolmente ridotto per il fatto che il processo elimina le operazioni multiple richieste dai metodi convenzionali. Per esempio, un lavoro che implica quattro o cinque operazioni convenzionali per un periodo di ore può richiedere soltanto un processo di lavorazione elettrochimica della durata di pochi minuti. Dato che al pezzo non viene applicata alcuna pressione, si possono lavorare fogli sottili e reti cellulari senza tema di produrre sollevamenti, torsioni o inarcature. D'altra parte, la lavorazione elettrochimica può in certe circostanze rivelarsi piú dispendiosa dei metodi convenzionali, dato che si richiedono notevoli capacità e tempo per poter progettare e costruire il catodo e la cella in grado di ospitare la lavorazione desiderata e di assicurare nel contempo un flusso uniforme di elettrolita. Se tuttavia si devono lavorare molti pezzi identici, il costo dell'attrezzatura può essere rapidamente ammortizzato grazie alla maggior efficienza della lavorazione elettrochimica, e per il fatto che non si verifica praticamente alcun consumo dell'utensile. Un altro svantaggio della lavorazione elettrochimica è costituito dal fatto che in talune soluzioni elettrolitiche le proprietà di resistenza alla fatica della superficie di certi materiali possono venire alterate dall'attacco chimico dell'elettrolita sui confini dei singoli grani (i confini dei minuscoli cristalli individuali che costituiscono il metallo).

L'utilizzazione dell'elettrochimica per la lavorazione delle superfici metalliche non è proprio una idea nuova; l'asportazione elettrochimica di strati sottili da superfici metalliche è stata praticata per molti anni nei processi industriali di elettropulitura (in cui la superficie del pezzo viene pulita) e di elettrolucidatura (in cui la superficie viene pulita e levigata). Per di piú, il concetto della lavorazione elettrochimica venne esposto in un brevetto inglese che risale addirittura al lontano 1929. L'applicazione pratica della lavorazione elettrochimica, tuttavia, è relativamente recente. Un problema che si presentava nei primi esperimenti era legato all'elettrolita, costituito normalmente da cloruro di sodio. La lavorazione elettrochimica realizzata con questo elettrolita conduceva spesso a pezzi lavorati con precisione insufficiente.

In un lasso di tempo di circa 15 anni il nostro gruppo presso i Laboratori di ricerca della General Motors studiò le proprietà, per la lavorazione elettrochimica, di parecchie centinaia di possibili elettroliti. Nel 1967 stabilimmo definitivamente che una soluzione di clorato di sodio ($NaClO_3$) costituisce un elettrolita di qualità superiore per la lavorazione elettrochimica dei metalli ferrosi, dal punto di vista di un buon controllo dimensionale e di una eccellente finitura delle superfici, ottenuti a elevate velocità di rimozione del metallo. Alla luce di questi concetti possiamo esaminare piú da vicino in che modo operi questo processo.

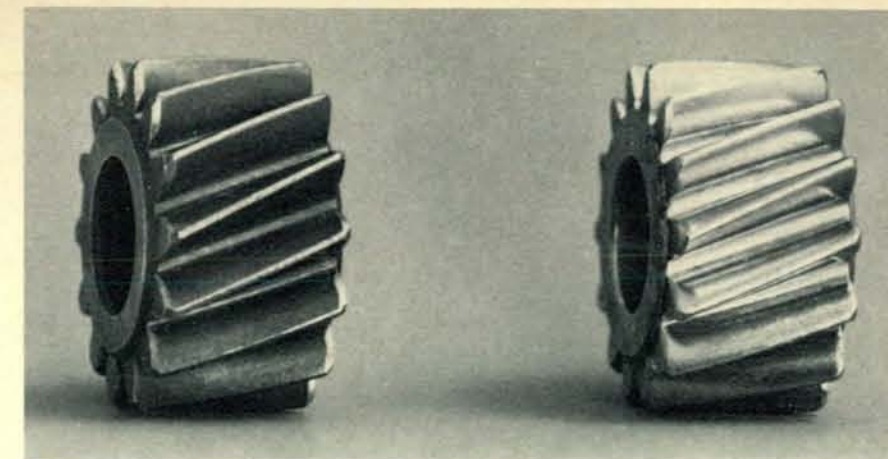
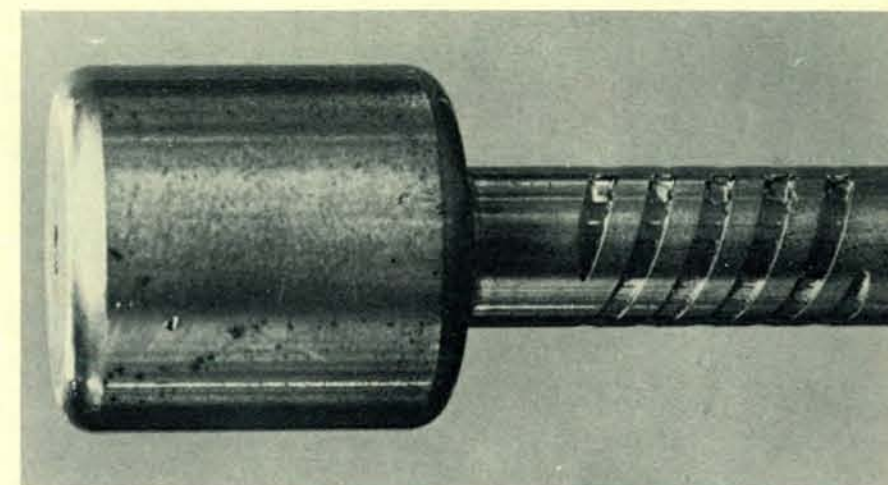
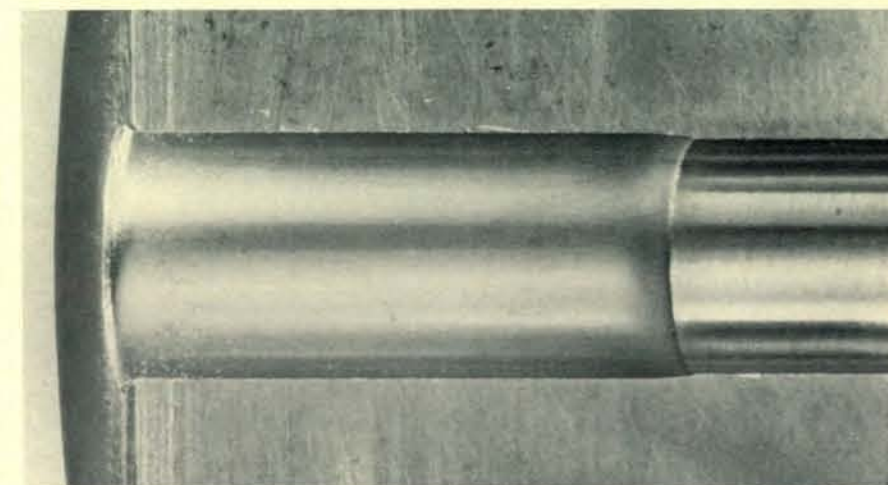
Supponiamo che un campione di metallo, come per esempio una sottile lamina di ferro, sia posto in un liquido corrosivo, per esempio una soluzione al 10 per cento di cloruro di sodio. Il ferro allora passa in soluzione, e ogniqualvolta un atomo di ferro abbandona due elettroni sulla fase metallica lo ione che ne deriva entra nella fase soluzione. Se questa reazione di ossidazione (ovvero questa perdita di elettroni) fosse l'unico processo che si verifica, allora si creerebbe una carica negativa crescente sulla superficie del metallo finché l'attrazione elettrostatica fra la superficie metallica carica negativamente e gli ioni di ferro positivi nella soluzione non oltrepassa la forza pilota responsabile della reazione di ossidazione. Allora cesserebbe la dissoluzione del metallo.

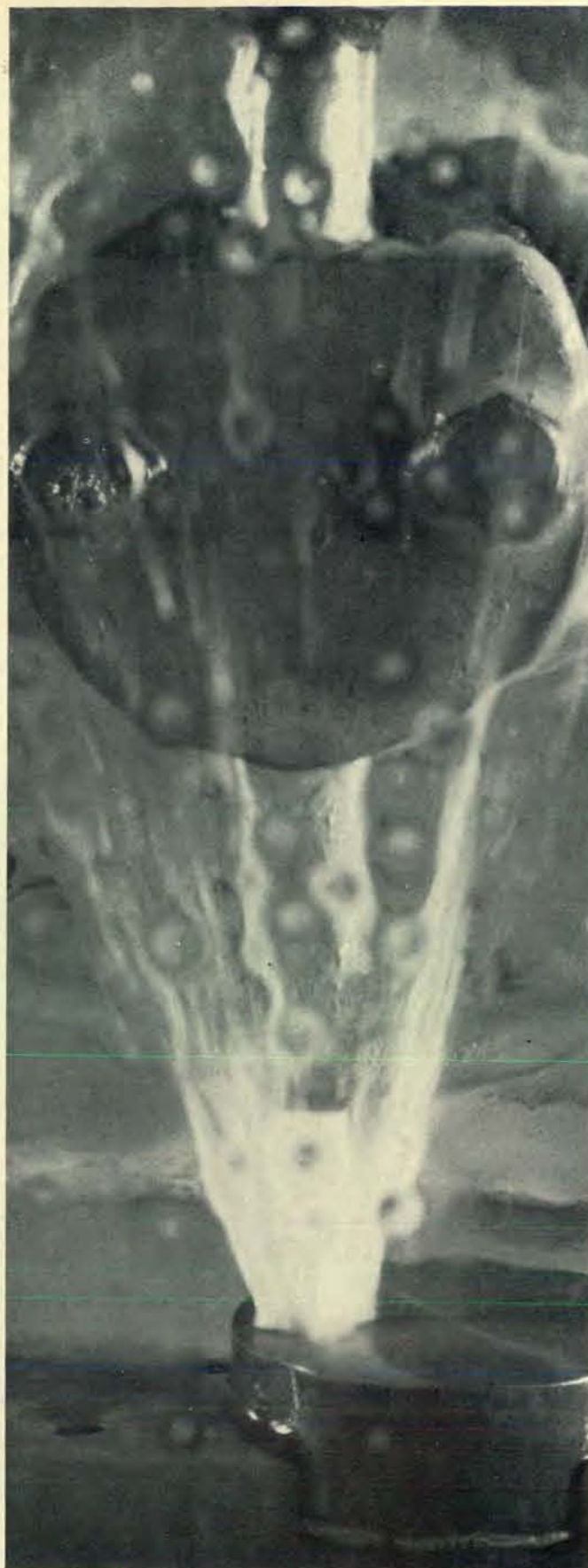
Se la corrosione deve procedere, deve esserci una via di scarico per gli elettroni. Tale scarico viene fornito dai processi di riduzione, che si veri-

I processi di lavorazione che è possibile realizzare per via elettrochimica comprendono, fra gli altri, i sei che sono schematizzati in queste illustrazioni. Per la tornitura (*a*) il catodo viene fissato in una data posizione mentre l'anodo di forma cilindrica viene fatto ruotare al di sotto di questo, producendo in tal modo nel cilindro una figura di rotazione legata alla forma dello spigolo vivo del catodo. Una cavità di forma assai complessa può essere ricavata da un blocco di metallo per mezzo di una sola operazione di lavorazione elettrochimica, chiamata incisione di conio (*b*). La conformazione esterna (*c*) di un pezzo come può essere la paletta di una turbina viene realizzata per mezzo di un catodo che riproduce la forma definitiva dei contorni della paletta. Con l'accorgimento di usare due catodi si possono lavorare contemporaneamente entrambi i lati della paletta. La rigatura interna (*d*) prevede l'uso di un catodo in cui solo una piccola « finestra » risulta attiva elettricamente. Se si fa ruotare l'utensile mentre passa attraverso la regione cava del pezzo, si può ottenere una figura elicoidale del tutto simile alla rigatura di una canna di fucile. Il taglio col filo (*e*) è in grado di asportare grossi blocchi di metallo dal pezzo in lavorazione. Il catodo è costituito in questo caso da un grosso filo oppure da un tubo sottile. Il taglio per immersione (*f*) impiega un tubo cavo in funzione di catodo. L'elettrolita viene pompato in continuità attraverso il catodo.

I solchi guida per l'olio incavati di soli sei millesimi di millimetro rispetto alla superficie di questo cuscinetto idrostatico sono stati ottenuti per via elettrochimica. Essi sono le figure esagonali regolarmente spaziate che si possono osservare intorno alla superficie del cuscinetto. Solchi cosí poco profondi e rifiniti con tanta cura come questi non si possono ricavare con la molatura, che sarebbe il metodo convenzionale di lavorazione. Per di piú, la molatura, come pure qualunque altro processo che contempli un contatto diretto fra l'utensile e il pezzo da lavorare, sarebbe dispendiosa sia in termini di denaro che di tempo.

ficano in questo modo: le varie parti di una superficie metallica non sono tutte attive allo stesso modo dal punto di vista elettrico. Quando si verifica un processo di ossidazione in un punto a elevata energia come un picco, un processo di riduzione (il quale coinvolge un guadagno di elettroni) può avvenire in un punto a bassa energia come una valle. Per esempio, l'ossigeno molecolare (O_2) sciolto nella fase liquida acquista elettroni e diventa acqua (H_2O) in un mezzo acido o in uno neutro, oppure diventa uno ione idrossido (OH^-) in un mezzo alcalino. Un altro esempio è costituito dalla evoluzione dell'idrogeno molecolare (H_2) attraverso la scarica da parte della fase liquida di ioni idrogeno positivi (H^+) in un mezzo acido, oppure di molecole d'acqua in un mezzo neutro o alcalino.

Gli elettroni scorrono attraverso il metallo dai punti di ossidazione verso quelli di riduzione. Il circuito è completato dal movimento degli ioni attraverso la fase liquida. Questo sistema viene spesso indicato col nome di cella localizzata.

Dato che la superficie del metallo possiede lo stesso potenziale elettrico in tutti i suoi punti, le reazioni anodica e catodica devono procedere a questo potenziale. Esso è chiamato potenziale misto. Per ottenere le reazioni anodica e catodica al potenziale misto, le reazioni in una cella localizzata devono venire polarizzate a partire dai loro rispettivi potenziali di equilibrio fino al potenziale misto per mezzo del passaggio di una corrente attraverso la cella localizzata. Questa corrente di polarizzazione prende il nome di corrente di corrosione o di corrente della cella localizzata. Tutti i fenomeni di corrosione dei metalli in ambiente bagnato avvengono secondo il meccanismo della cella localizzata.

Molti processi di cella localizzata sono lenti per il fatto che rimangono sotto il controllo catodico. Essi sono pure limitati dalla bassa velocità di diffusione dei reagenti verso le zone di riduzione (catodiche) sulla superficie del metallo corroso. Se tuttavia si pone il metallo corroso in contatto con un metallo « piú nobile » (cioè meno attivo) sul quale la reazione catodica può procedere piú facilmente, la corrente di corrosione può essere incrementata in modo notevole, e di conseguenza anche la velocità di dissoluzione del metallo. (Questo processo prende il nome di corrosione bimetallica e deve essere attentamente considerato in sede di progetto delle costruzioni industriali. Spesso si può osservare il risultato della corrosione bimetallica nella rapida e totale distruzione di un

Due ingranaggi già lavorati sono stati rifiniti per mezzo di procedimenti diversi. Entrambi gli ingranaggi sono stati realizzati all'apposita macchina automatica, ma mentre quello a sinistra è stato rifinito con un procedimento convenzionale, quello a destra è stato rifinito per mezzo della lavorazione elettrochimica, ottenendo risultati migliori

Questa vite, progettata per pompare un olio o un gas attraverso la sua guida di precisione, è stata dotata della sua sottile filettatura con un procedimento di lavorazione elettrochimica. La molatura è capace di tagliare il metallo piú duro ma non può realizzare la forma complessa di una tripla filettatura. Con la tornitura invece si può ben realizzare la filettatura, ma non si riesce a incidere il metallo quando questo è assai duro.

Il foro in questo supporto è stato realizzato con un procedimento convenzionale. Quindi una parte del foro è stata allargata per mezzo della lavorazione elettrochimica. Il processo elettrochimico è riuscito a produrre una sottile spalla, che in questa sezione è rappresentata dalla linea ben visibile al centro del foro sulla destra. La lavorazione elettrochimica ha prodotto anche una alesatura molto piú accurata della trapanatura.

La realizzazione di un foro in un blocco di metallo effettuata con un apparecchiatura elettrochimica nel laboratorio degli autori. A sinistra l'utensile catodico viene posizionato al di sopra del pezzo anodico prima dell'inizio dell'operazione. La verniciatura bianca sull'utensile non è altro che uno strato isolante di resina epossidica impiegato allo scopo di confinare l'azione di taglio all'estremità inferiore dell'utensile. A destra si vede l'elettrolita che sprizza fuori dal foro mentre quest'ultimo viene intagliato nel pezzo. L'elettrolita è infatti pompato ad alta pressione attraverso il centro del catodo. Uu apposito indice applicato alla macchina registra istante per istante la penetrazione dell'utensile da taglio allo scopo di controllare con precisione l'operazione.

fregio realizzato in alluminio o magnesio e attaccato al muro per mezzo di sostegni di ferro o acciaio in una zona a umidità elevata, come una stanza da bagno.)

La corrente di corrosione può essere incrementata ancor di piú se si applica un potenziale esterno al metallo da corrodere, rendendolo cosí l'anodo di una cella elettrochimica. Il circuito viene completato da un controelettrodo (il catodo) separato fisicamente dall'anodo per mezzo di una soluzione elettrolitica. Con questo sistema solo il processo anodico – ovvero il processo di ossidazione – si verifica sull'elettrodo da corrodere. La velocità della corrosione anodica può essere regolata alzando o abbassando il potenziale elettrico applicato.

Perché la lavorazione elettrochimica possa essere commercialmente competitiva con le tecniche di lavorazione convenzionali, le quali possono asportare il metallo alla velocità di circa due decimi di centimetro cubo al secondo, si richiedono densità di corrente estremamente elevate. Normalmente la corrente deve essere compresa fra 50 e 500 ampere al centimetro quadrato. In pratica il limite superiore alla densità della corrente che può essere utilizzata è imposto dalla disponibilità di raddrizzatori di elevate capacità, i quali devono convertire la corrente alternata in corrente continua, come richiesto dal sistema.

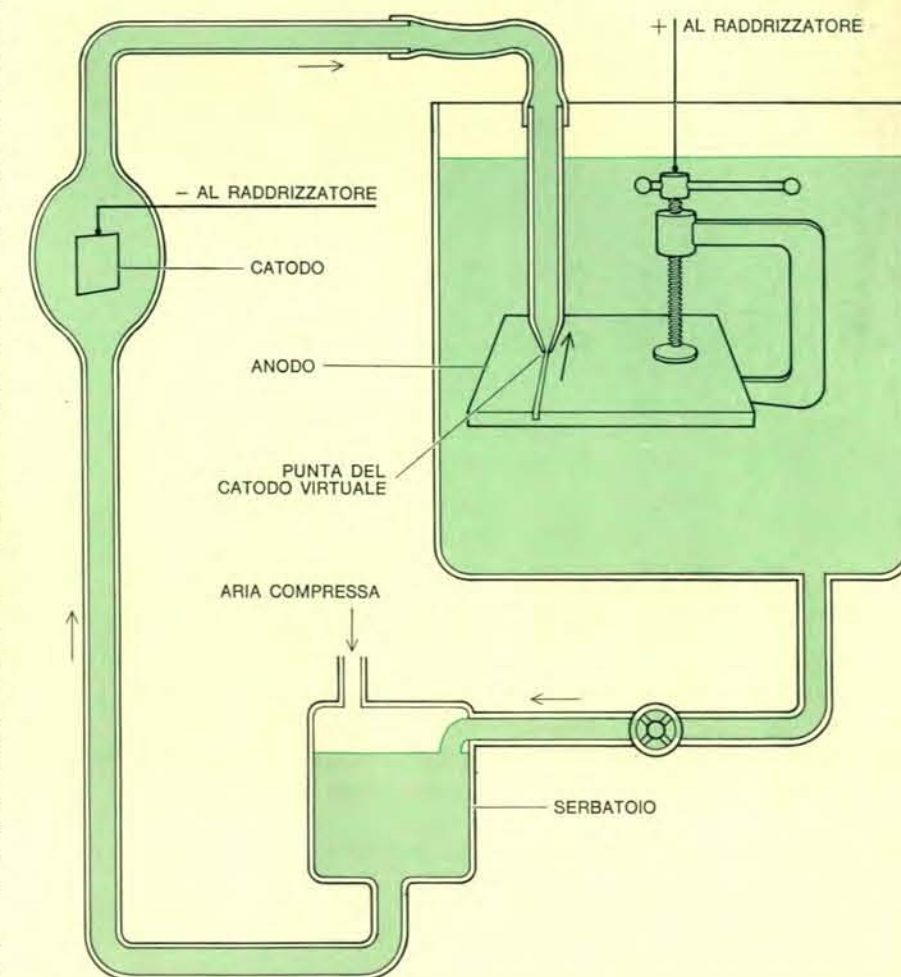
Con il passaggio di una corrente cosí elevata, il percorso seguito dall'elettrolita fra i due elettrodi deve essere mantenuto il piú breve possibile allo scopo di prevenire l'instaurarsi di una tensione eccessivamente elevata. La spaziatura fra i due elettrodi è normalmente compresa fra 0,05 e 1,3 millimetri. In altre parole, l'utensile e il pezzo da lavorare sono separati da qualche decimo di millimetro.

Al procedere della lavorazione elettrochimica, il metallo viene asportato dall'anodo che è il pezzo da lavorare, allargando in tal modo la spaziatura e riducendo cosí sia la corrente che la velocità di asportazione del metallo stesso. Allo scopo di compensare tali variazioni la distanza fra anodo e catodo deve essere mantenuta costante per mezzo di un sistema di guida meccanico. Un elettrodo è tenuto fermo mentre l'altro si muove.

Se l'elettrodo mobile avanza troppo rapidamente, può provocare un cortocircuito fra catodo e anodo, con ingenti danni all'utensile catodico dovuti a erosione da arco voltaico, nonché fusione, saldatura e distruzione meccanica del pezzo in lavorazione. Per prevenire un incidente cosí oneroso si utilizzano normalmente dei dispositivi di protezione assai sensibili allo scopo di interrompere la corrente in pochi microsecondi quando la spaziatura scende al di sotto di un particolare valore di sicurezza. Il dispositivo funziona di solito rivelando un eventuale improvviso aumento della corrente.

Per una data velocità di avanzamento e una data tensione applicata fra anodo e catodo il sistema tende rapidamente e automaticamente verso una spaziatura di equilibrio. Si consideri un sistema in cui la velocità di avanzamento provochi una diminuzione della spaziatura. Man mano che la spaziatura si restringe, aumenta la densità della corrente a causa del decremento di ciò che gli ingegneri elettrotecnici chiamano « la caduta RI » (secondo la legge Ohm, che dice che il prodotto della corrente I per la resistenza R è uguale alla forza elettromotrice E, chiamata anche potenziale oppure tensione). L'aumento della corrente, tuttavia, provoca un aumento della velocità di rimozione del metallo, manifestando cosí la tendenza ad aumentare la spaziatura fra gli elettrodi. Le forze opposte – la velocità di avanzamento che tende a restringere la spaziatura e la densità di corrente che tende ad allargarla – si bilanciano presto per ottenere la spaziatura di equilibrio fra l'utensile e il pezzo in lavorazione.

Poiché la corrente elettrica che scorre attraverso il sistema è molto elevata, l'elettrolita tende a riscaldarsi. Invero, se si permettesse all'elettrolita di restare fermo nello spazio compreso fra gli elettrodi, il calore generato vaporizzerebbe ben presto il liquido portando il processo di erosione del metallo in una situazione di stallo. Pertanto l'elettrolita deve essere pompato attraverso lo spazio compreso fra gli elettrodi a una notevole intensità di flusso.

A questo punto, tuttavia, sorge un altro problema. L'aumento di temperatura che si può misurare dal momento in

Un'apparecchiatura per l'erosione a getto è qui riprodotta schematicamente. Se il catodo viene lasciato fermo, l'apparecchio serve per praticare fori in un pannello metallico. Se si fa muovere il catodo, si ottiene l'erosione di un solco nel pannello, come è mostrato in questa figura. L'apparecchio spinge un getto di soluzione elettrolitica contro il pannello per mezzo di aria compressa. Il serbatoio antispruzzo raccoglie l'elettrolita.

cui l'elettrolita penetra nell'interstizio al momento in cui ne esce è risultato pari a circa 45 gradi centigradi. Un aumento cosí cospicuo è capace di produrre un incremento dell'ordine del 100 per cento nella resistenza specifica dell'elettrolita, e del 50 per cento nella sua viscosità. Qualunque fenomeno che si ripercuota sulla conduttività dell'elettrolita, proprio come fanno questi cambiamenti di temperatura, altera in definitiva la densità di corrente, e di conseguenza pure la velocità con la quale il metallo viene rimosso. Per prevenire una erosione non uniforme del metallo nei punti piú caldi della spaziatura, l'aumento di temperatura dell'elettrolita lungo il passaggio attraverso di essa deve essere mantenuto al di sotto di 10 gradi C. Pertanto il circuito di pompaggio del sistema elettrolitico viene di solito equipaggiato con uno scambiatore di calore.

L'aumento di temperatura può essere ridotto aumentando la velocità di flusso dell'elettrolita. Una velocità eccessiva, tuttavia, può condurre a un gradiente di pressione lungo la fenditura abbastanza elevato da provocare fenomeni di cavitazione, cioè la formazione spontanea di bollicine di vapore in seno alla soluzione nei punti sottoposti a una pressione negativa. La cavitazione interrompe la continuità della soluzione e provoca pertanto un irruvidimento generale delle superfici lavorate. Per le piú alte velocità di flusso si può ridurre la cavitazione e perfino eliminarla con appropriato progetto dei vari componenti del sistema. In ogni caso la velocità del flusso dell'elettrolita deve essere uniforme allo scopo di ottenere una altrettanto uniforme erosione del metallo.

Un altro motivo che induce a mantenere elevata la velocità del flusso è l'esigenza di asportare rapidamente i prodotti della corrosione dall'interstizio. Se l'elettrolita comincia a contaminarsi con granuli di metallo o di altre sostanze, la velocità del flusso diventa non uniforme, e cosí pure la distribuzione della corrente; di conseguenza il grado di finitura della superficie risulta piuttosto scadente. Per superare questa difficoltà è bene inserire nel circuito dell'elettrolita un filtro.

La lavorazione elettrochimica è un procedimento veramente versatile, tanto che con questo sistema si può compiere una notevole varietà di lavorazioni diverse (*si vedano le figure alle pagine 12 e 13*). Per esempio, un processo di lavorazione esterna può dar forma alle palette delle turbine per i motori a reazione impiegati in aviazione. L'utensile catodico è progettato per seguire i contorni della paletta ultimata; con una coppia di catodi opportunamente sagomati si possono lavorare entrambe le superfici della paletta contemporaneamente.

Cavità dalla forma molto complessa possono essere ricavate rapidamente (e con un grado di finitura superficiale del tutto accettabile) in blocchi di metallo completamente temperati per mezzo di una sola operazione di lavorazione elettrochimica conosciuta col nome di incisione di conio o di cavità. L'utensile ha la forma della cavità desiderata; questo catodo di forma particolare viene sospinto verso il blocco metallico dell'anodo mentre una soluzione elettrolitica viene pompata nello spazio fra i due elettrodi. Quando l'utensile si avvicina alla superficie del pezzo da lavorare, il metallo viene asportato dapprima solo dai punti piú elevati e poi anche da quelli piú bassi, seguendo la sempre maggiore penetrazione dell'utensile. Quando l'utensile è completamente penetrato nel pezzo, la corrente diventa praticamente costante in ogni punto.

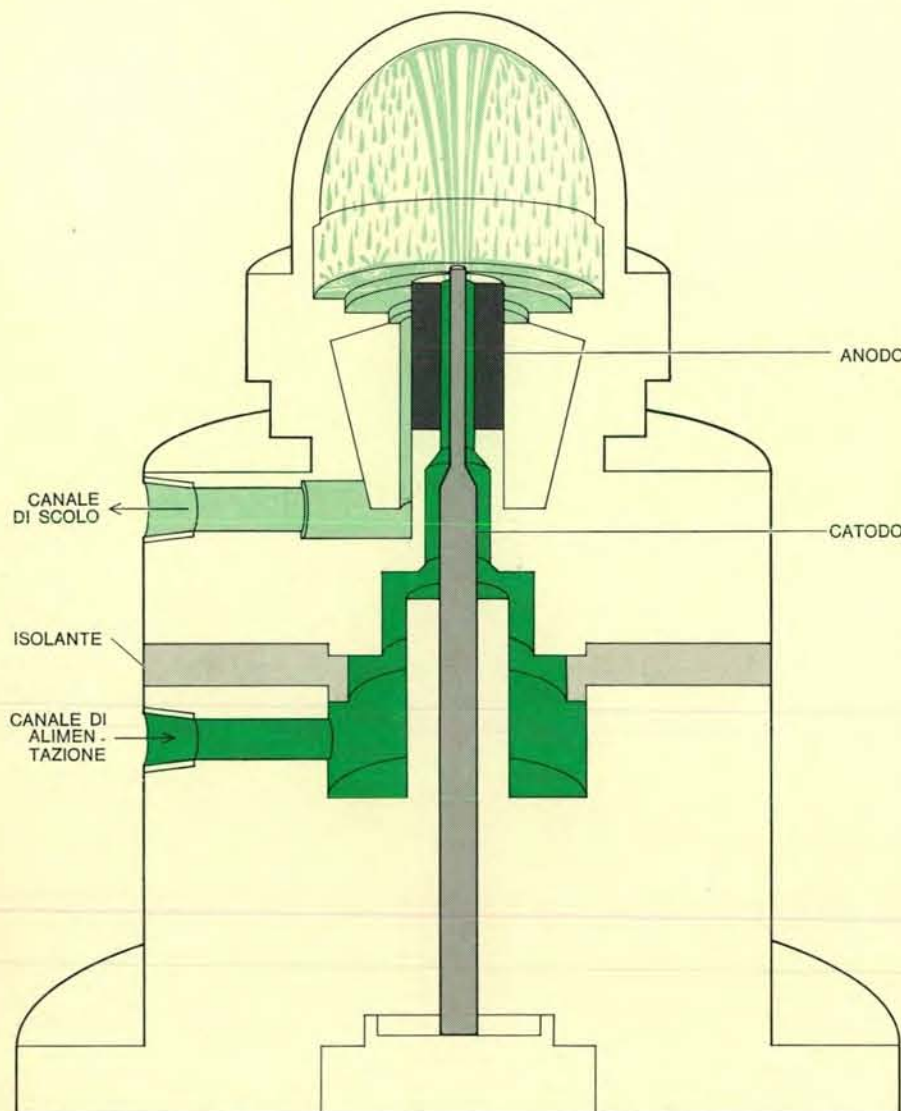
Un processo noto col nome di taglio per immersione viene spesso impiegato per praticare dei buchi nei getti metallici. L'utensile catodico è costituito da un tubo attraverso il quale viene pompato l'elettrolita; la sua forma è determinata dalla sezione del foro che si desidera ottenere. Dato che il metallo deve essere asportato soltanto dal fondo del foro, le pareti del tubo sono isolate elettricamente per mezzo di uno strato non conduttore come per esempio una verniciatura in resina epossidica. Le correnti vaganti provocano inevitabilmente una certa conicità del foro, ma tale problema può essere minimizzato con una opportuna progettazione del catodo e con una scelta oculata dell'elettrolita.

La natura del processo è tale per cui la circonferenza del fondo del foro viene lavorata piú in fretta che non la parte centrale, di modo che tutte le volte dal fondo del foro si sviluppa una specie di piccolo Vesuvio – una sporgenza di metallo convessa. È possibile che alla fine del taglio questa sporgenza venga a cadere contro la parete interna del catodo, provocando un cortocircuito. Per evitare questo rischio e nel contempo per prevenire una perdita di pressione nell'elettrolita quando l'utensile ha completato il suo lavoro e ha forato completamente il getto, si può attaccare alla base dell'anodo un falso pezzo da lavorare che funge pure da sostegno. Il metallo che in seguito formerà la sporgenza pericolosa viene fissato a questo sostegno per mezzo di una vite.

La lavorazione elettrochimica può essere impiegata anche per la tornitura, la trapanatura, la rigatura interna e il taglio per mezzo di un filo. Nel caso della tornitura il pezzo da lavorare di forma cilindrica viene fatto ruotare al di sotto di un catodo che presenta uno spigolo a coltello, e che rimane fisso in una data posizione. Nel caso della trapanatura un catodo cavo e sagomato secondo un ben preciso schema solleva pezzi di forma complessa ma di spessore uniforme dalla lastra metallica. La rigatura interna viene eseguita facendo passare un catodo sottile e appuntito contro la superficie interna di un cilindro cavo che funge da anodo. Se il cilindro viene fatto ruotare, si ottiene una rigatura elicoidale sulla superficie interna (del tutto simile alla rigatura di una canna di fucile). Il taglio con il filo è un'operazione che permette di asportare un grande volume di metallo. Un grosso filo oppure un sottile tubo metallico viene fatto passare attraverso il pezzo da lavorare. L'elettrolita viene fatto scorrere sul pezzo oppure pompato attraverso il tubo, da cui esce da minuti forellini proprio nella zona della reazione catodica.

Una nuova applicazione resa possibile dallo sviluppo della tecnica che impiega il clorato di sodio come elettrolita è costituita dall'incisione su superfici di acciaio accuratamente rettificate di sottili solchi. Per esempio, noi abbiamo ricavato solchi guida per l'olio nei cuscinetti ottenendo risultati veramente eccellenti in termini di controllo della geometria e della profondità (*si veda la figura a pagina 14*). In una applicazione tipica i solchi nei cuscinetti sono stati lavorati per via elettrochimica fino a una profondità di soli 0,0062 millimetri con una variazione di planarità sul fondo contenuta entro i limiti di 0,00062 millimetri. Questo tipo di lavorazione per mezzo di metodi convenzionali risulta costoso e richiede molto tempo. Infatti le tecniche convenzionali si limitano a operazioni in cui le dimensioni non scendono al di sotto di 0,013 millimetri. Un altro tipo del tutto simile di lavorazione elettrochimica può essere impiegato per incidere i filetti in una sbarra di acciaio bianco per la produzione di viti. Una volta che si sia ottenuto l'appropriato allineamento e la giusta spaziatura fra l'utensile e il pezzo, si possono produrre pezzi identici al ritmo di parecchie migliaia al giorno.

Una limitazione comune alle varie operazioni di lavorazione elettrochimica è costituita dal fatto che non si possono lavorare aree troppo estese, perché queste richiederebbero un flusso di corrente che non è possibile ottenere. Con un raddrizzatore della capacità di 10 000 ampere si possono lavorare soltanto 260 centimetri quadrati con una densità di corrente di 40 ampere al centimetro quadrato. Con un catodo di area ristretta che si sposta lungo l'anodo, tuttavia, si può asportare il metallo da vaste superfici senza bisogno di enormi correnti di linea. Un esempio di questo processo è la macchina alesatrice elettrolitica, nella quale il diametro interno di un pezzo viene dimensionato e rifinito con il passaggio del catodo internamente all'anodo. Noi siamo stati capaci di spostare una «finestra» catodica attraverso un'area anodica di 51 centimetri in 20 secondi – una velocità di lavorazione commercialmente utilizzabile. Il diametro esterno di un getto cilindrico può essere dimensionato e rifinito con il passaggio di un catodo di forma toroidale.

Alla luce delle applicazioni che abbiamo descritto e dello sviluppo del principio del catodo ad area limitata, possiamo prevedere un luminoso futuro per la lavorazione elettrochimica. Non c'è dubbio che la lavorazione elettrochimica nelle sue forme diverse è in grado di compiere molte operazioni meglio e in modo piú economico di quanto non facciano i metodi convenzionali applicati attualmente. Raccomandiamo soprattutto che gli industriali sviluppino le loro personali conoscenze di base e le relative esperienze in questo campo, in modo che si possano al piú presto sfruttare e applicare le inusitate possibilità offerte da tale processo.

Una macchina per la lavorazione elettrochimica realizzata per dimensionare e rifinire un supporto è vista qui in sezione. Il supporto da lavorare costituisce l'anodo. L'elettrolita viene pompato sopra il catodo e attraverso il supporto. Uno schermo contro gli spruzzi ricopre la parte superiore della macchina, e l'elettrolita che cosí si raccoglie viene inviato attraverso il canale di scolo verso un serbatoio per il riciclo. Questa macchina è stata costruita a scopo sperimentale nel laboratorio degli autori.

Il sistema nervoso della sanguisuga

È costituito da un apparato ripetitivo di gangli formati da poche cellule. Lo studio delle proprietà e delle connessioni tra queste cellule spiega alcuni riflessi comportamentali e mostra come essi vengono modificati

di John G. Nicholls e David Van Essen

I segnali con cui le cellule nervose trasmettono le informazioni sono essenzialmente gli stessi in tutto il regno animale. Perciò molti problemi della neurofisiologia sono stati affrontati con successo mediante lo studio di animali dotati di cellule nervose particolarmente grandi e quindi adatte alla sperimentazione. I meccanismi della conduzione dell'impulso nervoso e il trasporto attivo di ioni all'interno e all'esterno delle cellule nervose, per esempio, furono per la prima volta descritti nei neuroni giganti della seppia. I principi appresi in questi e altri invertebrati si rivelarono in seguito essenzialmente identici a quelli che governano gli stessi processi nei piú complessi sistemi nervosi dei vertebrati, inclusi i mammiferi e persino l'uomo; piuttosto che una via indiretta, lo studio condotto sugli invertebrati si è quindi rivelato una scorciatoia.

Se a un ricercatore interessato ai principi generali dell'organizzazione neurale fosse richiesto di progettare l'animale sperimentale ideale, egli probabilmente non avrebbe nessun problema nel dare le sue caratteristiche. Il cervello dovrebbe contenere relativamente poche cellule, forse solo poche centinaia, in modo da poter analizzare in dettaglio le proprietà funzionali di ciascun elemento. I singoli corpi cellulari dovrebbero essere abbastanza grandi per potervi impiantare con facilità microelettrodi ed essere studiati con tecniche biochimiche, ciò nonostante l'intero cervello dovrebbe essere abbastanza piccolo da poter essere completamente sezionato in serie per studi al microscopio elettronico. Le connessioni sinaptiche fra le cellule dovrebbero essere abbastanza numerose in modo da dar luogo a un comportamento complesso nell'animale e d'altra parte abbastanza semplici da essere messe in evidenza dal punto di vista elettrico e anatomico, e dovrebbero essere soggette a modificazioni capaci di alterare il comportamento dell'animale. Infine, il ciclo riproduttivo di questo animale dovrebbe essere sufficientemente breve da permettere lo studio dei fattori genetici responsabili delle varie fasi dello sviluppo.

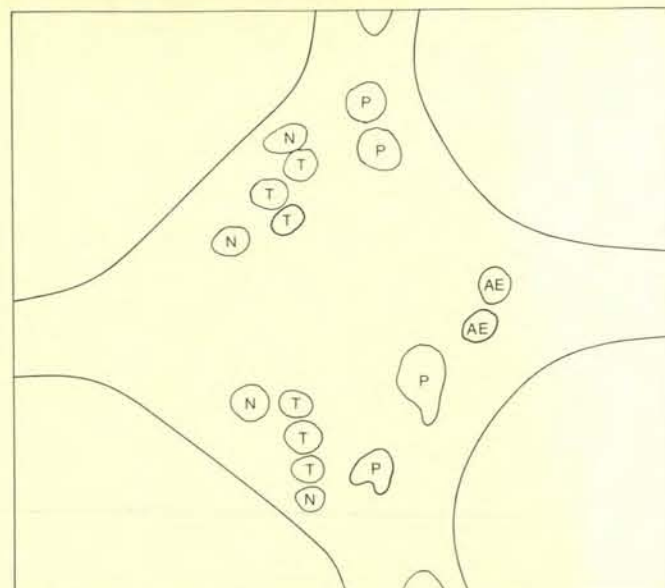
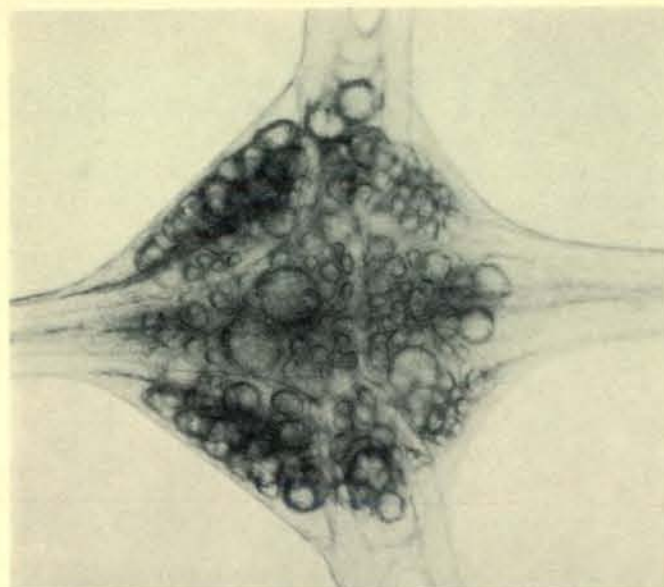
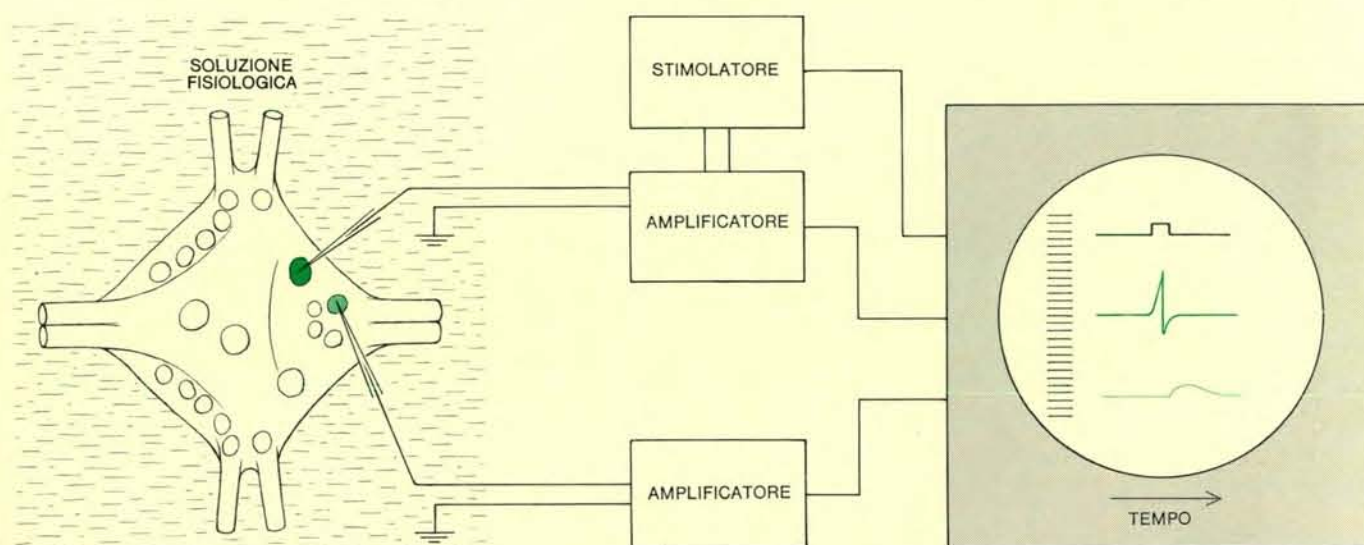
Purtroppo non esiste un sistema nervoso con tutte queste caratteristiche, alcune delle quali si escludono a vicenda. Cosí bisogna accontentarsi di differenti preparazioni sperimentali per studiare vari aspetti dell'attività funzionale del sistema nervoso. Per esempio, il cervello relativamente piccolo del moscerino della frutta, la drosofila, e di certi piccoli nematodi viene utilizzato per analizzare i fattori genetici che determinano la formazione delle connessioni neurali. Certi molluschi e crostacei, che non sono adatti a studi genetici a causa del loro lento sviluppo, hanno neuroni particolarmente grandi e quindi adatti per gli studi sulla biochimica di singole cellule e sulle connessioni fisiologiche che sono alla base dei riflessi comportamentali. Abbiamo trovato che la sanguisuga è un animale da esperimento particolarmente adatto per chiarire vari problemi tra cui la specificità neurale, la trasmissione sinaptica, l'integrazione, la plasticità del comportamento e la rigenerazione delle connessioni.

Cominciammo ad analizzare il sistema nervoso cellula per cellula. La sanguisuga possiede solo una piccola quantità di cellule nervose che svolgono una particolare funzione. Per esempio, ogni cellula sensoriale innerva da sola una larga superficie di pelle mentre nei mammiferi questa funzione è svolta da numerose cellule. È quindi possibile attivare selettivamente una singola cellula nervosa sensoriale con una stimolazione naturale e pertanto suscitare un riflesso semplice. La catena di eventi che questo stimolo mette in moto può allora essere seguita elemento per elemento attraverso il sistema nervoso. Gran parte dello sforzo iniziale è stato rivolto all'identificazione delle cellule nervose sensoriali e motrici che partecipano ad alcuni riflessi e allo studio del comportamento di questi neuroni e delle loro caratteristiche elettriche quando sono in azione. Una tale conoscenza preliminare, ma precisa, è essenziale per sapere in che modo l'azione di un neurone sia modificata dalla sua attività precedente e come i segnali vengano trasmessi al sistema nervoso centrale. Un altro vantaggio derivante dalla conoscenza in dettaglio delle connessioni è che si può studiare come le singole cellule nervose si rigenerano per formare delle connessioni dopo che le loro fibre sono state danneggiate da una lesione. Questo solleva la questione fondamentale della specificità neurale, che, a sua volta, è determinante sul modo di considerare i fattori genetici coinvolti nell'organizzazione del sistema nervoso durante lo sviluppo.

Nei nervi degli animali superiori e inferiori è la membrana cellulare che, attraverso la sua permeabilità selettiva ai diversi ioni, permette all'impulso nervoso di instaurarsi e propagarsi. Numerosi esperimenti hanno dimostrato che le cellule nervose degli invertebrati sono molto simili a quelle del nostro organismo per quello che riguarda sia la struttura che la trasmissione dei segnali. In ogni caso il neurone produce potenziali elettrici dell'ampiezza di circa un decimo di volt e della durata di una frazione di secondo. Come i brevi punti e linee dell'alfabeto Morse, questi sono segnali stereotipati che convogliano l'informazione da un'estremità della cellula all'altra. L'informazione viene trasmessa da una cellula alla seguente a livello delle sinapsi, dove numerose fibre assoniche in arrivo convergono su una cellula-bersaglio postsinaptica. In genere, la trasmissione attraverso la sinapsi avviene mediante la liberazione da parte delle terminazioni presinaptiche di una sostanza chimica specifica: il mediatore. Alcuni mediatori eccitano la cellula successiva inducendola a emettere impulsi; altre tendono a inibirla reprimendone l'attività. Entrambe le sinapsi eccitatorie e inibitorie si trovano in tutti i sistemi nervosi e il loro modo di operare è in sostanza simile. Le cellule possono anche interagire attraverso sinapsi elettriche, dove la corrente si trasmette direttamente da una cellula all'altra senza l'intervento di un mediatore chimico.

I vantaggi essenziali della sanguisuga derivano dalla semplice organizzazione, che si riflette nella struttura del suo sistema nervoso. Sia il corpo che il sistema nervoso sono costituiti da un certo numero di unità ripetitive molto simili e il comportamento consiste in un repertorio relativamente semplice di movimenti compiuti da gruppi ben definiti di muscoli. Ogni segmento del corpo è innervato da un ganglio. (Anche i « cervelli » specializzati a livello cefalico e caudale sono semplicemente gangli fusi insieme in cui molti aspetti caratteristici possono ancora essere riconosciuti.) Tutti i gangli sono simili tra loro e non differiscono da un animale all'altro. Ogni ganglio contiene solamente circa 350 cellule nervose con

Il corpo della sanguisuga *Hirudo medicinalis* è costituito da numerosi segmenti quasi uguali tranne i due estremi. La superficie della maggior parte dei segmenti è divisa in cinque anelli circolari; l'anello centrale di ogni segmento è dotato di piccoli organi sensoriali chiamati papille sensoriali. Il sistema nervoso (*in colore*) che si estende lungo il lato ventrale dell'animale è formato da tanti gangli quanti sono i segmenti. Vi sono due « cervelli », uno ad ogni estremità, costituiti da gangli fusi tra loro. Le ventose servono alla locomozione e quella posta sul capo serve anche per attaccarsi all'ospite e succhiarne il sangue.

Il sistema nervoso della sanguisuga (*in colore*) è situato all'interno di un vaso sanguigno. I gangli sono uniti da fasci di connessione appaiati, ciascuno dei quali serve un lato del ganglio; da ogni ganglio attraverso due radici si dipartono dei fasci di fibre nervose che innervano la pelle e i muscoli. La parete del corpo è formata da vari strati di guaine muscolari. La contrazione dei muscoli circolari fa allungare l'animale, mentre i muscoli longitudinali e obliqui lo fanno piegare o accorciare; i muscoli dorso-ventrali invece lo appiattiscono. I diverticoli sono vaste sacche dell'intestino. Una sanguisuga adulta ha una larghezza di circa 0,6 cm e una lunghezza che può variare da 2,5 a 10 cm a seconda di quanto tempo è trascorso dall'ultimo pasto.

Ganglio segmentale ingrandito circa 85 volte nella microfotografia a sinistra e disegnato a destra. I contorni delle singole cellule si vedono chiaramente; da esse partono fasci di connessione appaiati verso i gangli contigui e, attraverso le radici, verso la pelle, i visceri e i muscoli. Le sette cellule sensoriali su ogni lato del ganglio comprendono tre cellule sensibili al tatto (*T*), due cellule sensibili alla pressione (*P*) e due cellule sensibili agli stimoli nocivi (*N*) che rispondono rispettivamente a un tocco leggero, a una pressione piú forte e a uno stimolo nocivo ancora piú accentuato. Sono anche indicate due cellule nervose motrici dette anello-erettrici (*AE*). Le illustrazioni rappresentano la superficie ventrale del ganglio; i grandi motoneuroni longitudinali, anch'essi coinvolti in alcuni degli esperimenti dell'autore, si trovano invece sulla superficie dorsale.

Con l'apparecchiatura qui rappresentata vengono stimolate singole cellule e i loro potenziali vengono registrati con sottili elettrodi di vetro. La cellula stimolata produce un impulso (*colore scuro*), che viene registrato lo stesso elettrodo. L'impulso può anche indurre una cellula connessa a quella stimolata a generare un potenziale sinaptico (*colore chiaro*), che a sua volta può essere registrato. Le tre registrazioni (*in basso*), mostrano gli impulsi caratteristici dei tre tipi di cellule sensoriali: le cellule sensibili al tatto, alla pressione e agli stimoli nocivi. La parte ascendente del tracciato in nero indica la durata della corrente stimolante; i tracciati in colore corrispondono agli impulsi; ciascuno rappresenta il grafico che appare all'oscilloscopio in seguito alla variazione del potenziale della membrana cellulare entro un certo periodo di tempo espresso in millivolt.

caratteristiche forme, misure, posizioni e tipi di ramificazioni. Un ganglio innerva un territorio ben definito del corpo attraverso le sue radici che sono fasci appaiati di assoni e comunica con le varie regioni del sistema nervoso attraverso fasci assonici chiamati di connessione. Un segmento e il suo ganglio possono essere studiati da soli o unitamente a vari segmenti adiacenti.

Molti illustri anatomisti hanno studiato il sistema nervoso della sanguisuga. Lo svedese Gustaf Magnus Retzius, piú di 80 anni fa, eseguí alcuni disegni in cui non solo riconobbe le singole cellule, ma le raggruppò in classi sulla base delle loro caratteristiche morfologiche. Piú tardi fu confermato che i suoi raggruppamenti avevano una reale validità funzionale, cosicché i disegni di Retzius sono ancora validi negli studi fisiologici. Le tre cellule del disegno di Retzius riprodotto qui a fianco, per esempio, hanno diverse proprietà elettriche della membrana e un ruolo funzionale specifico: si tratta di cellule sensoriali che reagiscono a un tocco leggero applicato a delle aree ben definite della pelle. Altri due tipi di cellule sensoriali rispondono in maniera specifica alla pressione e agli stimoli nocivi. Ogni cellula di questo tipo può essere riconosciuta con criteri morfologici e l'identificazione può essere confermata registrando le proprietà elettriche della membrana. La tecnica consiste nell'inserire un sottile elettrodo nella cellula, nello stimolarla facendovi passare una corrente e quindi nel registrare gli impulsi elettrici che la cellula emette. Questi potenziali di azione, nel caso di una cellula sensibile al tatto, sono simili ma piú piccoli e piú brevi di quelli delle cellule sensibili alla pressione e delle cellule sensibili agli stimoli nocivi. Queste ultime si possono distinguere anche per un aumento passeggero particolarmente intenso del potenziale di membrana (chiamato iperpolarizzazione) che segue lo impulso. Nelle cellule nervose motrici gli impulsi e le proprietà elettriche sono ancora differenti e piuttosto caratteristici. Con la pratica si può osservare un unico potenziale d'azione e riconoscere il tipo di cellula in cui si trova l'elettrodo.

I tipi di ramificazione di una cellula possono essere seguiti iniettando un colorante fluorescente specifico o stimolando la cellula e poi registrando i segnali provenienti dai suoi assoni. Il tracciato di ogni cellula è caratteristico e la distingue dalle altre. Si può determinare il tipo delle connessioni sinaptiche tra le cellule stimolando e poi registrando con degli elettrodi intracellulari. Sebbene i potenziali sinaptici sorgano a una certa distanza dal corpo cellulare, nella complessa regione del neuropilo posta al centro del ganglio, essi sono sufficientemente vicini da essere registrati a livello del corpo cellulare.

Un metodo di preparazione adatto per identificare le cellule sensoriali e motrici in un ganglio consiste nel togliere una parte della parete del corpo della sanguisuga con il ganglio o i gangli che la innervano. La preparazione sopravvive bene per piú di 12 ore in una soluzione fisiologica e permette di

Il disegno eseguito nel 1891 dall'anatomista svedese Retzius (*a sinistra*) rappresenta cellule tattili, mentre la fotografia a destra riproduce le stesse cellule in una preparazione eseguita dall'autore. Nel disegno si possono vedere tre cellule con le loro ramificazioni, che, attraverso le radici, percorrono i fasci di connessione e si dirigono verso il centro del ganglio per formare sinapsi con altre cellule. Nel ganglio a destra una di queste cellule sensibili al tatto è stata iniettata con un colorante fluorescente specifico. La somiglianza delle sue ramificazioni con quelle delle cellule disegnate da Retzius dimostra l'alto grado di precisione della geometria neuronale della sanguisuga.

I disegni rappresentano le ramificazioni di tre cellule sensoriali e di una cellula nervosa motrice; per l'esecuzione ci si è basati su sezioni in serie di gangli nei quali le singole cellule erano state colorate con un colorante specifico. Le cellule sensibili al tatto (*T*), agli stimoli nocivi (*N*) e alla pressione (*P*) inviano sottili processi nel neuropilo (l'area situata al centro del ganglio) dove formano alcune sinapsi con altre cellule, incluso il grande motoneurone longitudinale (*L*). Quest'ultimo invia il suo assone attraverso il ganglio per innervare il muscolo longitudinale del lato opposto.

Risposta delle cellule sensoriali alla stimolazione della pelle. Per eseguire l'esperimento si è isolata una porzione di parete a cui, mediante le radici, rimaneva collegato un ganglio. Registrazioni simultanee eseguite su cellule sensibili al tatto e alla pressione mentre la pelle veniva sfiorata leggermente, dimostravano che solo le cellule sensibili al tatto venivano eccitate (*a*). Una pressione esercitata da una forza di sette grammi causava una scarica prolungata nella cellula *P* e una breve scarica con adattamento nella cellula *T* (*b*). Quando le cellule sensibili alla pressione e agli stimoli nocivi venivano stimolate contemporaneamente, uno stimolo di sette grammi eccitava la cellula *P* ma non la cellula *N* (*c*); invece uno stimolo di 21 grammi eccitava entrambe le cellule (*d*).

studiare dettagliatamente i riflessi semplici. Per esempio, quando si tocca o si fa pressione sulla pelle della sanguisuga, essa reagisce accorciando prima il segmento colpito e poi i segmenti adiacenti. Questo riflesso assomiglia in molti aspetti al comune riflesso patellare nell'uomo, ma nella sanguisuga si può sperare di analizzare tutte le cellule nervose coinvolte dapprima nel far convergere l'informazione dalla pelle al sistema nervoso centrale e in seguito nel suo movimento di ritorno verso i muscoli. Come prima cosa descriveremo le cellule motrici che innervano i muscoli e producono movimenti e in seguito le cellule sensoriali che convergono su di esse e sono attivate dalla stimolazione della pelle.

Per determinare se una data cellula è un motoneurone, la prima cosa da fare è stimolarla con un elettrodo intracellulare e vedere se una qualunque parte della parete del corpo si contrae. Se vi sono dei movimenti, bisogna eseguire ulteriori esperimenti per confermare se l'assone della cellula stimolata forma una sinapsi direttamente sulle fibre muscolari. (Molte cellule che hanno delle funzioni piuttosto differenti possono produrre indirettamente delle contrazioni attivando i motoneuroni.) Finora sono state identificate 17 paia di motoneuroni che soddisfano questi criteri posti simmetricamente ai due lati del ganglio. Queste 34 cellule probabilmente costituiscono la maggior parte dei motoneuroni nella sanguisuga, che compie soltanto un numero limitato di movimenti semplici. Questi consistono nell'accorciare il proprio corpo in risposta a stimoli cutanei, nuotare, avvolgersi e spostarsi come un lombrico usando le ventose. I muscoli principali che eseguono questi movimenti sono sistemati in tre strati. Direttamente sotto la pelle vi sono delle fibre circolari che si contraggono per far allungare l'animale. Vengono poi delle fibre oblique incrociate, e, ancora più in profondità, delle robuste fibre longitudinali che contribuiscono all'accorciamento e alla torsione. Inoltre vi sono gruppi di muscoli che fanno appiattire l'animale e fanno erigere protuberanze (simili alla pelle d'oca) sugli anelli circolari che si possono distinguere sulla pelle dell'animale. Ogni motoneurone innerva solo uno dei muscoli sopra descritti e, in ogni muscolo, solo una frazione delle fibre muscolari.

Prenderemo in considerazione in dettaglio una cellula motrice, il motoneurone delle «grandi fibre muscolari longitudinali». È su questa cellula *L* che

Sulla pelle i campi recettivi di cellule sensibili al tatto e alla pressione normali si sovrappongono leggermente. I campi di ognuna delle tre cellule sensibili al tatto furono tracciati toccando la pelle e segnando le zone da cui si ottenevano delle risposte (*a*). Le zone centrali davano una risposta più efficace. Con un esperimento simile si sono tracciati i campi di due cellule normali sensibili alla pressione (*b*). Fu studiato anche un ganglio anomalo con tre cellule sensibili alla pressione invece di due (*c*). Un tracciato accurato rivelò che i campi recettivi di due di esse (P_2 e P_3) si sovrapponevano quasi completamente; questo fatto dimostrava che in realtà le due cellule compivano il lavoro normalmente svolto da una sola cellula.

cellule sensoriali di diverso tipo convergono per produrre i riflessi di accorciamento nell'animale. L'assone dalla cellula *L* innerva la parete del corpo dalla parte opposta, dove si trovano le fibre muscolari longitudinali del segmento di quel lato che producono un rapido accorciamento del segmento. Le cellule *L* appaiate da ogni parte del ganglio sono accoppiate elettricamente, in modo che i loro impulsi sono sincronizzati e agiscono sinergicamente. Questo è un buon esempio dello schema funzionale delle connessioni cellulari: l'accoppiamento coordina i due lati e assicura un accorciamento uniforme del corpo. La cellula *L* non viene utilizzata per nuotare o per far piegare l'animale verso l'alto, di lato o verso il basso; questi movimenti sono ottenuti da altri motoneuroni che innervano strette fasce di fibre muscolari longitudinali poste sul dorso, sui lati o sulla parte inferiore dell'animale.

L'informazione sensoriale che giunge al ganglio di un segmento può anch'essa essere analizzata facilmente. Le cellule sensibili al tatto (*T*) si eccitano in risposta a un leggero tocco sulla superficie della pelle. Sono sufficienti scalfitture di 0,05 millimetri o meno; in verità, le cellule *T* sono così sensibili che rispondono allo scorrimento di un fluido sulla pelle. La scarica sensoriale di una cellula *T* a una stimolazione prolungata rallenta rapidamente e di solito cessa entro una frazione di secondo, ma si può provocare una scarica continua di impulsi, quando lo stimolo tattile è mosso avanti e indietro nel campo recettivo. Le cellule sensibili alla pressione (*P*) rispondono solamente a una marcata deformazione della pelle e la loro scarica dura spesso da 10 a 20 secondi o più, se la pressione è prolungata. La frequenza della scarica è proporzionale all'intensità dello stimolo. Un tocco leggero è inefficace nello stimolare queste cellule, mentre una pressione di vari grammi applicata con uno stilo smussato è sufficiente per produrre una scarica ad alta frequenza. Le cellule sensibili agli stimoli nocivi (*N*) richiedono stimoli meccanici ancora più forti. La scarica a frequenza più alta e prolungata viene evocata da una deformazione notevole, per esempio pizzicando la pelle con delle pinze o graffiandola con uno spillo. Le cellule *N*, come le cellule sensibili alla pressione, danno una scarica stabile, e spesso continuano ad essere eccitate anche dopo che lo stimolo è stato tolto. I tre tipi di cellule sensoriali – 14 cellule per ganglio – rispondono specificatamente e selettivamente a stimoli meccanici e non sono attivate da variazioni, anche notevoli, di temperatura, acidità o pressione osmotica del liquido in cui sono immerse. Vi è un notevole parallelismo tra queste cellule meccano-sensoriali della sanguisuga e quelle che innervano la pelle umana, che fanno anch'esse distinzione fra tatto, pressione profonda e stimoli nocivi o dolorosi. Numerosi esperimenti indicano che queste cellule nella sanguisuga sono vere cellule sensoriali piuttosto che neuroni di secondo o terzo ordine stimolati solo indirettamente da neuroni sensoriali alla periferia, e che sono esse a convogliare l'informazione sensoriale ai gangli di ogni segmento.

Ognuna delle 14 cellule sensoriali innerva una porzione di pelle ben definita e risponde solo agli stimoli applicati entro uno di questi campi recettivi circoscritti. I confini di un campo possono essere identificati attraverso punti di riferimento come la segmentazione e la colorazione della pelle, cosicché si può predire quale cellula sarà eccitata quando viene toccata, premuta o pizzicata una determinata area. Ogni cellula innerva una regione un po' più vasta di un segmento (da 7 a 9 anelli invece che 5). Conseguentemente due cellule dello stesso tipo in gangli adiacenti innervano le zone che confinano con un segmento. D'altra parte non vi è molta sovrapposizione nei campi recettivi delle cellule in un ganglio che innerva la stessa zona. Una cellula sensibile al tatto, per esempio, innerva o la parte dorsale o quella laterale o quella ventrale della pelle (*si veda la figura in alto*); la sovrapposizione è dell'ordine di un millimetro, ossia circa della larghezza di un anello. Una distribuzione territoriale così ri-

gida, con un simile grado di sovrapposizione, è valida per le cellule sensibili alla pressione e agli stimoli nocivi. Inoltre, all'interno del campo recettivo di una singola cellula il territorio per ogni ramo assonale costituisce una suddivisione distinta.

Queste osservazioni dimostrano l'alto grado di specificità dimostrato dalle singole cellule. Per sapere quali siano i fattori che determinano l'estensione dell'area innervata da una singola cellula sarebbe utile eseguire degli esperimenti sullo sviluppo embrionale o sulle mutazioni genetiche, ma il ciclo riproduttivo della sanguisuga è troppo lento per questo. Occasionalmente capita di trovare animali con anomalie evidenti del sistema nervoso e una sanguisuga di questo tipo è stata studiata in dettaglio. Alcuni dei suoi gangli contenevano cellule sensibili alla pressione o al tatto e cellule motrici anello-erettrici, o *AE*, (cellule che fanno alzare le protuberanze sugli anelli soprannumerarie). Per una mutazione o un difetto nello sviluppo il numero totale delle cellule era chiaramente anomalo. Ci siamo chiesti come si sarebbe comportata una cellula sensoriale soprannumeraria. In un ganglio che conteneva tre cellule sensibili alla pressione invece di due sul lato destro, tutte e tre avevano le posizioni, le proprietà di membrana e le configurazioni degli impulsi caratteristiche delle cellule *P*. Due di esse, tuttavia, mandavano i loro assoni tramite la stessa radice verso la pelle del dorso e rispondevano alla pressione nello stesso campo; ogni cellula si comportava come se fosse unica. In modo simile, in gangli con quattro cellule tattili invece di tre, le dimensioni del campo e le posizioni erano normali, ma un campo era innervato due volte. In alcuni gangli, tuttavia, vi erano due pressocettori soprannumerari (quattro in un lato) e in questi la sistemazione dei campi periferici era alterata. Le esperienze eseguite su questo singolo animale suggeriscono che quando vengono prodotte durante lo sviluppo cellule in eccesso di un tipo particolare, esse operano in parallelo, ma solo fino a un certo punto. Inoltre si è dimostrato che una cellula può ricevere un numero di sinapsi maggiore del normale. Mentre le due cellule *P* in gangli normali formano una sinapsi con il motoneurone *AE*, in questo animale anomalo una cellula *AE* potrebbe ricevere connessioni sinaptiche da tre o quattro cellule *P*. È probabile che in altri animali si riscontrino altre anomalie interessanti che permetterebbero di comprendere le regole fondamentali con cui le cellule-bersaglio sono innervate durante lo sviluppo.

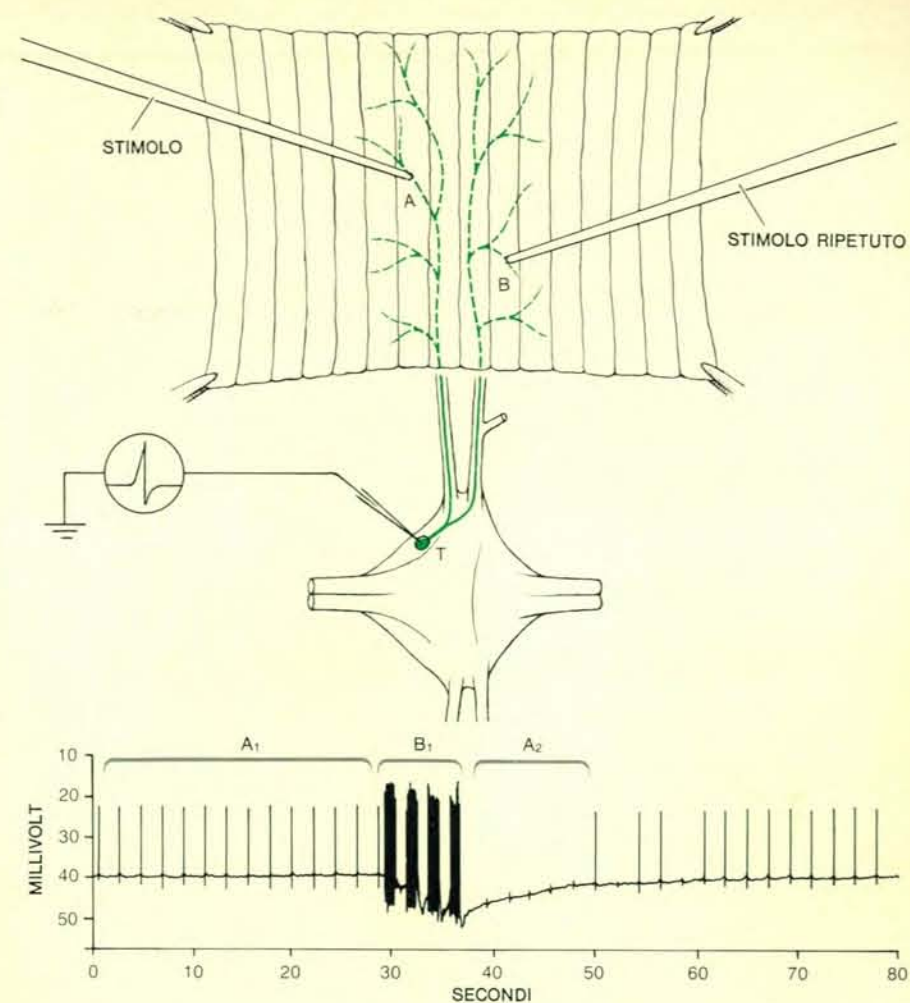
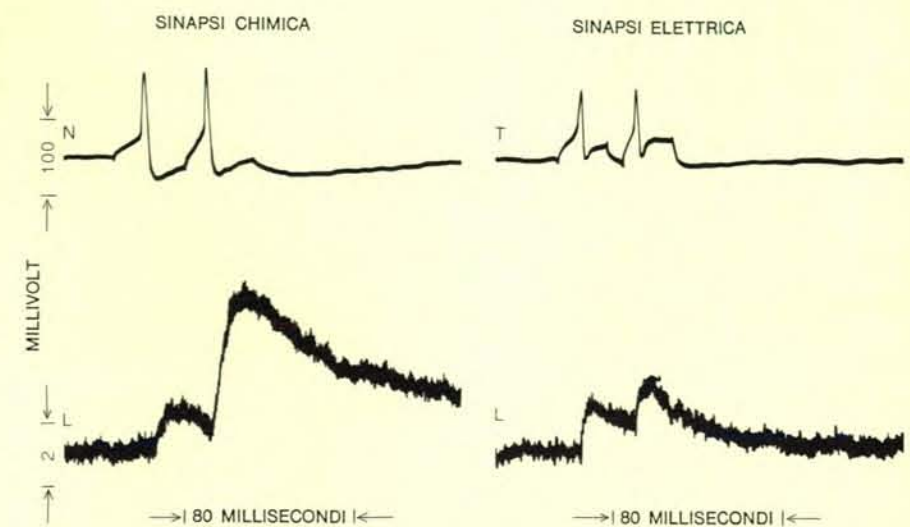
Abbiamo finora considerato le cellule sensoriali e motrici come unità indipendenti, ma per una vera comprensione del sistema nervoso è necessario sapere come le cellule interagiscono per produrre i movimenti. Alcune informazioni ci sono fornite da semplici riflessi come l'accorciamento dei segmenti dovuto alla pressione piú o meno violenta esercitata sulla pelle della sanguisuga. Gli elementi afferenti di questi riflessi sono rappresentati dalle cellule sensoriali *T*, *P* e *N*, che convergono su un motoneurone *L* che innerva la muscolatura longitudinale della parete del corpo. È chiaro che le connessioni delle cellule sensoriali *T*, *P* e *N* con il motoneurone *L* sono dirette e non vi sono cellule intermedie sconosciute. Questo è un punto importante, perché solo se ogni costituente e le sue proprietà sono conosciuti è possibile determinare con esattezza i siti nei quali ha luogo ogni modificazione interessante del comportamento nella trasmissione dei segnali.

Per mettere in evidenza i riflessi comportamentali permessi da queste connessioni, si separa un lembo di parete del corpo insieme al suo ganglio. Gli impulsi sensoriali e motori che giungono al ganglio e da questo partono sono controllati da elettrodi posti sulle radici e le tensioni generate dal muscolo longitudinale sono registrate da un misuratore di tensione. L'attività

PRESSIONE
SUPERFICIE DELLA PELLE 1
8
MUSCOLO LONGITUDINALE
2
CORPI DELLE CELLULE SENSORIALI 3
T
7
5 SINAPSI ELETTRICA
N
4 SINAPSI CHIMICA
P
6 SINAPSI ELETTRICHE E CHIMICHE
CORPO DEL NEURONE MOTORE
L

Generazione e controllo del riflesso di accorciamento. La pelle viene stimolata meccanicamente (*1*), inducendo la cellula sensoriale interessata a scaricare un impulso nervoso, che è registrato dagli elettrodi posti sulla radice (*2*). Anche la singola cellula sensoriale può essere stimolata con un microelettrodo (*3*). Nell'uno e nell'altro caso gli impulsi della cellula sensoriale raggiungono il grande motoneurone longitudinale (*L*) attraverso una sinapsi chimica (*4*) o elettrica (*5*) o dei due tipi (*6*), provocando un impulso motorio lungo l'assone del motoneurone rivelato dagli elettrodi posti sulla radice (*7*). Un misuratore di tensione indica l'accorciamento del muscolo (*8*).

nelle fibre muscolari può essere registrata anche con un elettrodo intracellulare. In queste condizioni un unico impulso sensoriale causa solo un piccolo aumento nella tensione delle fibre muscolari longitudinali, ma leggere, ripetute stimolazioni della pelle del dorso danno luogo a scariche di impulsi nelle cellule tattili che conseguentemente causano un accorciamento della parete del corpo. Quando alla cellula *L* viene impedito di eccitarsi mediante una corrente iperpolarizzante (che diminuisce la sua eccitabilità) le contrazioni riflesse vengono bloccate. Questo dimostra che la cellula *L* è l'unica cellula motrice che contribuisce a questo particolare tipo di riflesso. La stessa cosa si può dimostrare per le cellule *N* e *P*.

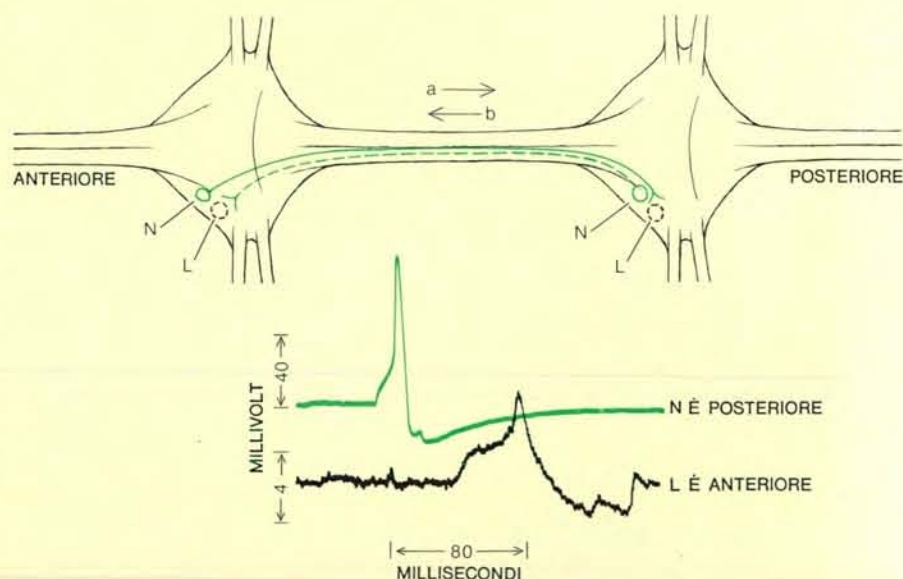
Queste tre semplici vie esemplificano le differenti forme di trasmissione dei segnali che si incontrano nel sistema nervoso degli animali superiori. Le cellule sensibili agli stimoli nocivi agiscono sul motoneurone *L* attraverso sinapsi chimiche convenzionali, le cellule sensibili al tatto attraverso sinapsi elettriche e le cellule sensibili alla pressione attraverso una combinazione dei due meccanismi. Esistono dei metodi per distinguere i diversi tipi di trasmissione sinaptica. Le proprietà caratteristiche delle sinapsi elettriche risiedono nel fatto che la corrente si trasmette direttamente e rapidamente da cellula a cellula e che la trasmissione non è bloccata da un'alta concentrazione di ioni magnesio. La connessione della cellula sensibile al tatto con la cellula motrice *L* soddisfa questi criteri. La stimolazione della cellula sensibile agli stimoli nocivi, d'altro canto genera un potenziale sinaptico nella cellula *L* con un ritardo da due a quattro millisecondi rispetto al massimo potenziale d'azione presinaptico. Questo ritardo è tipico di una sinapsi chimica. Inoltre, come ci si può aspettare da una sinapsi di questo tipo, la trasmissione viene abolita in modo reversibile, immergendo la preparazione in una soluzione contenente una concentrazione anormalmente alta di ioni magnesio, e questo blocco è neutralizzato aumentando la concentrazione di ioni calcio; quest'azione antagonista dei due ioni si trova in altre sinapsi chimiche, dove il magnesio riduce e il calcio aumenta la quantità di mediatore liberato dalle terminazioni presinaptiche in risposta a un impulso. Nessuna diffusione diretta di corrente può essere invece messa in evidenza tra la cellula sensibile agli stimoli nocivi e il motoneurone. Il terzo tipo di neurone sensoriale, la cellula sensibile alla pressione, dà luogo a potenziali sinaptici nel moto-

Stimoli ripetuti diminuiscono la sensibilità di una cellula a uno stimolo meccanico. Brevi stimoli meccanici, appena al disopra del valore soglia, (*A*) danno inizio ciascuno a un singolo impulso che viene registrato in A_1. Stimolando ripetutamente un'altra porzione dello stesso campo recettivo (*B*), si ha iperpolarizzazione (B_1) della cellula sensibile al tatto, cioè, aumento del potenziale di riposo. La cellula diviene infatti meno sensibile, e, per un certo periodo, non risponde come prima allo stimolo breve (A_2).

Le sinapsi chimiche ed elettriche si comportano in maniera diversa con l'attività ripetitiva. Nel caso di una cellula sensibile agli stimoli nocivi (sinapsi chimica), gli impulsi successivi liberano quantità sempre maggiori di mediatore e producono potenziali più elevati in un motoneurone (*a sinistra*). Ciò non avviene nel caso di una cellula sensibile al tatto (sinapsi elettrica) che dà luogo nel motoneurone a potenziali costanti (*a destra*). In generale le sinapsi elettriche sono molto più stabili di quelle chimiche.

I vari motoneuroni si comportano in maniera diversa in risposta alle stimolazioni ripetitive provenienti dallo stesso tipo di cellula sensoriale. I tracciati mostrano che i potenziali *(in nero)* provocati in un motoneurone anello-erettore *(AE)* da una cellula sensibile agli stimoli nocivi *(N)* aumentano di circa due volte e mezzo il loro valore originale e rimangono ampi; i potenziali provocati in un grande motoneurone longitudinale *(L)* sono piú elevati all'inizio, ma, in seguito, divengono inferiori.

neurone *L* con determinate caratteristiche dei meccanismi elettrici e chimici: un componente del potenziale viene ritardato e ridotto dagli ioni magnesio.

Un aspetto importante del funzionamento del sistema nervoso è la proprietà dei neuroni e delle sinapsi di variare in seguito alla stimolazione prolungata. In varie cellule nervose di vertebrati e invertebrati il potenziale di membrana aumenta in seguito a una successione di impulsi, e questo fenomeno a sua volta riduce l'eccitabilità delle cellule. Nella sanguisuga questa iperpolarizzazione è di grande ampiezza e di lunga durata. Per esempio, l'attivazione naturale di una cellula sensibile al tatto, alla pressione o alle stimolazioni nocive da parte di appena alcuni stimoli ripetuti può far aumentare il potenziale di membrana da un valore di riposo di 45 millivolt a 70, tornando poi gradualmente alla norma entro 15 minuti. L'iperpolarizzazione non è limitata al corpo cellulare, ma ha luogo anche nei suoi assoni periferici e in sottili processi all'interno del neuropilo.

Due meccanismi cellulari distinti sono responsabili dell'iperpolarizzazione. Uno è l'attività della pompa ionica, che elimina gli ioni sodio carichi positivamente che entrano nella cellula nervosa durante gli impulsi e perciò riporta i gradienti di concentrazione ionica al loro livello originale. (È stato dimostrato in altre cellule che simili meccanismi di trasporto possono avvenire attraverso un enzima posto nella membrana). L'altro meccanismo è un aumento prolungato della permeabilità della membrana al potassio che fa sí che il potenziale di membrana venga iperpolarizzato.

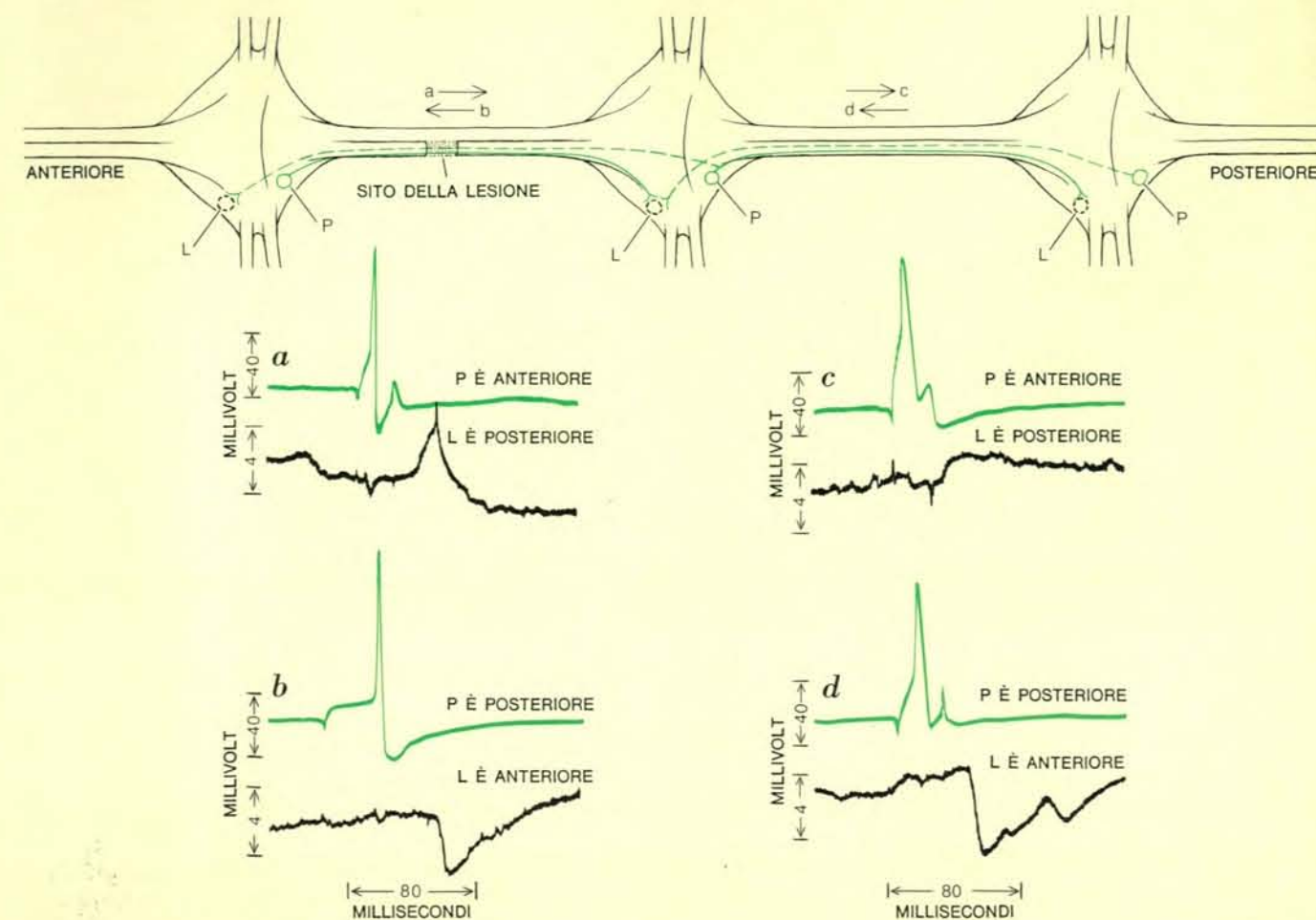
Gli effetti della variazione del potenziale di membrana sulla trasmissione dell'informazione sensoriale possono venire studiati nelle cellule tattili a causa della facilità con la quale esse possono essere attivate. Toccando una porzione della pelle di una sanguisuga con una bacchettina per alcuni secondi, è necessaria una piú forte stimolazione elettrica o meccanica per causare gli impulsi. Questa diminuzione dell'eccitabilità si verifica nell'intero campo recettivo della cellula sensibile al tatto (*si veda la figura in alto nella pagina precedente*). Sia gli impulsi che viaggiano verso il ganglio che quelli che si dirigono verso la pelle, lasciano dietro di sé un'iperpolarizzazione. Vi è una notevole somiglianza tra i cambiamenti alla periferia, lungo l'assone e il corpo cellulare, dove il potenziale di membrana può venire registrato direttamente con un microelettrodo. In ogni sito vi è una diminuzione di eccitabilità che va di pari passo con l'iperpolarizzazione che segue gli impulsi; questa come l'aumento del valore soglia è abolita dalla strofantidina, che è conosciuta per la sua azione selettiva sui processi di trasporto ionico che portano gli ioni sodio fuori dalla cellula.

La direzione della stimolazione può essere importante quando un impulso proveniente da una cellula sensoriale eccita un motoneurone nel ganglio vicino. La cellula sensibile agli stimoli nocivi in un ganglio eccita la cellula *L* sullo stesso lato del ganglio successivo. Anche in un sistema nervoso intatto *(in alto)* il potenziale provocato nella cellula *L* non è esattamente lo stesso quando il motoneurone si trova dietro la cellula *(a)* o quando questo è situato in posizione cefalica *(b)*; vi è una leggera componente inibitoria nel segnale in direzione postero-anteriore. L'effetto direzionale è intensificato se si taglia e si permette la rigenerazione di un fascio di connessione *(a destra)*, in cui le cellule sono in grado di interagire nuovamente. Quando una cellula sensoriale viene stimolata, essa produce un normale potenziale eccitatorio in un motoneurone posteriore ad essa *(a)* ma un'iperpolarizzazione anormale, o inibizione, in un motoneurone anteriore ad essa *(b)*. Ciò non rappresenta un errore nella riconnessione: lo stesso effetto direzionale può essere osservato lungo tutto l'animale che è stato operato. Anche nei gangli che sono situati a una certa distanza dalla lesione l'effetto è eccitatorio in direzione cefalo-caudale *(c)*, mentre è inibitorio nella direzione opposta *(d)*.

Dopo queste esperienze è necessario sapere come eccitazioni ripetute influenzino le proprietà delle sinapsi e dei riflessi. Ritenevamo che le sinapsi elettriche rimanessero piuttosto stabili nel modo di reagire, mentre le sinapsi chimiche dovrebbero venire influenzate piú facilmente. Per dimostrare questa ipotesi possiamo stimolare numerosi tipi di cellule sensoriali diversi ed esaminare i potenziali sinaptici formati nella sola cellula *L* con la quale essi sono connessi. Se una cellula sensibile agli stimoli nocivi che agisce attraverso una sinapsi chimica viene attivata per qualche secondo, i potenziali sinaptici registrati nella cellula *L* durante la prima scarica aumentano (fenomeno chiamato facilitazione) e in seguito diminuiscono (depressione). In teoria questi due cambiamenti di comportamento potrebbero essere causati da variazioni nella quantità di mediatore liberato dalla terminazione presinaptica (sensoriale) a ogni successivo impulso o causati da cambiamenti nella sensibilità della membrana postsinaptica (motoneurone). Numerosi esperimenti suggeriscono che è il meccanismo di liberazione del mediatore che viene influenzato dalla attività precedente.

Gli effetti dell'eccitazione ripetuta sulla trasmissione sinaptica chimica sono messi particolarmente bene in evidenza dal raffreddamento. Le sanguisughe vivono frequentemente in stagni freddi e possono essere mantenute in vita in frigoriferi per lunghi periodi, ma in preparazioni isolate raffreddate a 2 °C la trasmissione chimica da parte del nocicettore alla cellula *L* diventa praticamente inefficace entro pochi secondi non appena i potenziali di azione diminuiscono di misura. Se tutte le sinapsi si comportassero cosí, le sanguisughe sarebbero rapidamente paralizzate dal freddo. Il fatto è che le connessioni sinaptiche delle cellule motrici *L* e *AE* sono influenzate in modi diversi dall'attività ripetitiva e dal freddo. Le sinapsi poste sulle cellule *AE* mostrano una maggiore facilitazione e una minore depressione durante una scarica di stimoli che non quelle poste sulle cellule motrici *L*. Questi risultati suggeriscono che la stessa cellula sensoriale possa agire con efficacia progressivamente maggiore su una cellula-bersaglio mentre la sua efficacia su altre cellule diminuirebbe. La stimolazione meccanica della pelle perciò dà inizio a una duplice sequenza di reazioni: prima un accorciamento di breve durata, e poi un'erezione prolungata degli anelli. Anche queste prove indirette dimostrano che a variare sono le caratteristiche di liberazione del mediatore chimico a livello delle varie terminazioni della cellula sensoriale.

Il comportamento delle sinapsi elettriche è piuttosto diverso. Anche attraverso una stimolazione ripetuta del neurone delle cellule tattili, che forma una sinapsi elettrica sulle cellule *L*, i potenziali sinaptici rimangono invariati. Inoltre la sinapsi continua a funzionare efficacemente anche al freddo. Possiamo concludere che le sinapsi elettriche forniscono una forma di trasmissione piú costante che quelle che operano attraverso la liberazione di mediatori chimici; esse sono meno influenzate dall'attività precedente o dalle condizioni ambientali.

Numerosi esperimenti sugli invertebrati e vertebrati indicano che le connessioni sinaptiche delle cellule nervose sono specifiche, nel senso che connessioni molto intricate vengono stabilite selettivamente tra alcune cellule ma non tra altre. Finora conosciamo ben poco i processi che permettono alle cellule nervose di trovare i loro bersagli durante lo sviluppo o la rigenerazione, né è chiaro come una qua-

lunque cellula formi le sue connessioni in differenti animali. Finora gli esperimenti sui sistemi nervosi dei vertebrati sono stati rivolti al ristabilimento delle connessioni sinaptiche fra gruppi di cellule nervose. Un buon sistema per studiare la rigenerazione fra singole cellule è fornito dalle connessioni delle cellule sensoriali di un ganglio con le cellule motrici L del ganglio seguente. I fasci di connessione che collegano due gangli adiacenti arrivano fino a un centimetro di lunghezza e possono essere tagliati senza difficoltà. Le cellule particolari che abbiamo esaminato prima e dopo la rigenerazione sono le cellule sensibili agli stimoli nocivi e alla pressione. Negli animali di controllo gli impulsi in queste cellule N e P evocano i potenziali sinaptici nei motoneuroni L dei gangli adiacenti verso la parte anteriore e posteriore dell'animale. Queste connessioni interganglionari anteriori e posteriori sono dirette e assomigliano a quelle che si trovano all'interno di un ganglio.

Dopo aver anestetizzato la sanguisuga si taglia uno dei due fasci di connessione paralleli lasciando intatto il fascio di connessione restante perché serva come spunto per la rigenerazione. La lesione elimina le connessioni sinaptiche delle cellule sensoriali con le cellule motorie nei due gangli adiacenti alla lesione, sul lato operato della sanguisuga (non vi sono fibre che passino da un fascio di connessione a quello della parte opposta). Anche le fibre che si dirigono verso gangli distanti e verso il cervello alle due estremità della sanguisuga sono interrotte dall'operazione. Per un periodo da 45 a 260 giorni dopo l'operazione le sanguisughe vengono esaminate per trovare i segni di rigenerazione e le giunzioni sinaptiche alterate. Nella maggior parte delle sanguisughe il fascio di connessione tagliato presenta segni evidenti di rigenerazione, benché qualche volta non possa ricrescere a causa della formazione di una cicatrice.

Nelle sanguisughe in cui è avvenuta la rigenerazione, le connessioni sinaptiche si riformano fra le cellule sensoriali di un ganglio e la cellula motrice L nel ganglio successivo, inoltre le connessioni sono specifiche: quando attiviamo le cellule P o N in un ganglio registrando contemporaneamente in successione su 10 o piú neuroni nelle vicinanze della cellula motrice L del ganglio vicino, si ottenevano potenziali sinaptici nelle cellule L ma non in altre cellule. (A volte, nelle paia di gangli rigenerati, uno o due neuroni posti in prossimità della cellula L possono presentare potenziali sinaptici. Non possiamo ancora dire se ciò rappresenta un declino della precisione delle connessioni rigenerate).

Benché le cellule appropriate interagiscano ancora una volta dopo la rigenerazione, alcune proprietà delle sinapsi rigenerate sono diverse da quelle osservate nelle sanguisughe normali. In particolare l'equilibrio dell'eccitazione e dell'inibizione è notevolmente alterato. In una direzione dello stimolo la risposta assomiglia a quella normale: quando una cellula sensoriale del ganglio anteriore viene stimolata, si registra un potenziale sinaptico eccitatorio, depolarizzante nella cellula L del ganglio posteriore attraverso il fascio di connessione rigenerato. D'altra parte, quando la direzione dello stimolo è invertita (dalla cellula sensoriale posteriore alla cellula motrice anteriore), appare un potenziale sinaptico inibitorio, iperpolarizzante nella cellula motrice L. Questa asimmetria negli effetti sinaptici si trova invariabilmente ogni volta che le connessioni sinaptiche vengono ristabilite.

L'isolamento di un ganglio modifica le interazioni sinaptiche all'interno di esso. Se si lascia in sito per 36 giorni un ganglio dopo che le sue radici e i suoi fasci di connessione sono stati tagliati, uno stimolo esercitato su una cellula P, che in condizioni normali eccita anche la cellula AE (*a sinistra*), la inibisce notevolmente (*a destra*).

A prima vista sembrava che le variazioni tra le interazioni sinaptiche osservate dopo la rigenerazione potessero rappresentare una qualche forma di errore nella riconnessione. Piuttosto inaspettatamente, tuttavia, abbiamo trovato che cambiamenti simili avvengono nelle interazioni di gangli adiacenti lungo l'intera lunghezza della sanguisuga operata. La spiegazione può dipendere dal fatto che, sebbere le connessioni di questi gangli non siano direttamente danneggiate dall'operazione, presumibilmente gran parte del normale traffico di impulsi viene per sempre ridotto dall'interruzione delle fibre che collegano i gangli piú lontani e i due cervelli alle estremità dell'animale. La somiglianza fra queste alterazioni nelle connessioni sinaptiche di paia di neuroni in gangli distanti e quelle trovate nelle sinapsi rigenerate suggeriva un riesame delle connessioni nella sanguisuga normale. Eseguendo su un calcolatore elettronico la media delle risposte sinaptiche, apparve una piccola, ma uniforme asimmetria nelle connessioni fra le cellule sensoriali e le cellule L nei gangli contigui. Andando dalla cellula sensoriale posteriore alla cellula motrice anteriore, si può distinguere una componente inibitoria del potenziale sinaptico di breve latenza, ma nella direzione opposta (dalla cellula sensoriale anteriore verso la motrice posteriore) si nota solo un'eccitazione. L'esistenza di questa asimmetria negli animali di controllo suggerisce che i cambiamenti marcati nelle connessioni sinaptiche dopo l'operazione rappresentano un incremento della funzionalità di una via sinaptica presente, ma di solito nascosta, piuttosto che la formazione di una via nuova anormale.

Questi risultati che coinvolgevano gangli notevolmente distanti tra loro, ci spinsero a indagare sui cambiamenti che si potevano verificare all'interno di un singolo ganglio privato dei normali fasci di ingresso. Provammo a togliere tutti i fasci connettivi e i nervi periferici di un ganglio, lasciando il ganglio isolato in una « cultura d'organo » nell'animale, senza alcuna possibilità di rigenerazione. Quando il ganglio viene tolto dalla sanguisuga dopo circa un mese, molte delle connessioni sinaptiche normali appaiono notevolmente cambiate. Se, per esempio, si esaminano le interazioni della cellula T con il motoneurone L in uno di questi gangli isolati, è chiaro che il potenziale sinaptico è prodotto da una combinazione dei meccanismi chimici ed elettrici; il potenziale è molto piú elevato e persiste piú a lungo del potenziale sinaptico puramente elettrico osservato in una sinapsi della cellula T in gangli normali. Vi è, in altre parole, un afflusso chimico in piú, che potrebbe essere causato dalla crescita anormale di nuove fibre da un neurone interposto o potrebbe rappresentare un cambiamento diretto nelle connessioni sinaptiche dalle cellule T alle cellule L. Un altro cambiamento di notevoli proporzioni si verifica nelle interazioni delle cellule P e AE nei gangli isolati: invece di un potenziale eccitatorio nella cellula AE, se ne osserva uno inibitorio, iperpolarizzante quando la cellula P è stimolata. Vi è un comportamento correlato con queste connessioni alterate: se si esercita una pressione sulla pelle, qualunque anello che sia in erezione viene subito appiattito.

Le cause alla base di questi cambiamenti nelle interazioni delle cellule sensoriali e motrici dopo una lesione non sono ancora pienamente comprese, ma si ritiene che la lesione renda inefficaci le fibre che normalmente hanno la loro sinapsi sui motoneuroni L ed AE. Questa parziale carenza di fasci nervosi potrebbe portare a una ipersensibilità chimica, alla crescita accessoria di fibre nervose collaterali o alla formazione di nuovi contatti sinaptici; stiamo ora cercando di distinguere fra queste e altre possibilità attraverso un certo numero di differenti tecniche. Ciò che è stato chiarito in base ai risultati ottenuti con lesioni sperimentali è che i neuroni della sanguisuga possono rigenerarsi con un alto grado di precisione, e che le sinapsi all'interno del sistema nervoso centrale possono variare di molto la loro attività.

A prima vista l'analisi di un cervello costituito da cosí poche cellule potrebbe sembrare un problema limitato, eppure siamo appena all'inizio dello studio dei problemi piú importanti. Per esempio, stiamo solo ora cominciando uno studio dell'anatomia e della chimica delle cellule nervose e delle sinapsi. Per ora si conosce ben poco sul comportamento integrato della sanguisuga, anche se Stent e i suoi colleghi dell'Università della California a Berkeley hanno compiuto notevoli progressi nell'analizzare i meccanismi neuronali coinvolti nel nuoto. Recentemente abbiamo iniziato a esaminare la struttura degli embrioni di sanguisuga nella speranza di trovare un sistema nervoso in miniatura che possa essere ricostituito anatomicamente. Un altro approccio promettente è il mantenimento dei gangli vivi al di fuori dell'animale in cultura d'organi, dove si possano studiare i neuroni in un ambiente controllato per lunghi periodi di tempo.

L'età degli elementi

Lo studio della formazione e del decadimento spontaneo dei nuclei radioattivi può rivelare l'epoca della creazione di alcuni elementi; da questa informazione è possibile risalire all'età dell'universo

di David N. Schramm

Da quando l'uomo ha acquistato la facoltà di formulare pensieri in termini astratti, ha compiuto riflessioni intorno alla natura dell'universo, includendovi la sua origine e la sua età. Per valutare l'età dell'universo si può ricorrere allo studio del processo di decadimento radioattivo, che continua a svolgersi da miliardi di anni mantenendosi assolutamente inalterato nel meccanismo. Ma la circostanza piú importante riguarda la velocità del processo di decadimento, che è rimasta costante fin dal primo momento in cui gli elementi si furono formati. Alla luce delle nostre conoscenze attuali, possiamo affermare con certezza che un campione di uranio-238, quale ne sia l'origine, si trasformerà gradualmente in piombo e che questa trasmutazione si compirà secondo una velocità tale che metà degli atomi di uranio saranno diventati atomi di piombo in 4,5 miliardi di anni (tempo di dimezzamento). Non v'è ragione che ci induca a credere che il meccanismo e la velocità di questo processo presentassero una qualche differenza nel lontanissimo passato, quando l'universo era neonato.

La storia di questi innumerevoli eventi nucleari è scritta negli elementi chimici donde è formata la Terra e il resto dell'universo. Attraverso la corretta interpretazione di questa storia, è possibile datare la formazione di questi elementi; ciò ci permette a sua volta di stabilire l'età dell'universo. La disciplina scientifica che si basa sull'impiego di queste tecniche prende il nome di cosmocronologia nucleare.

Esistono numerose altre strade attraverso le quali si può giungere alla determinazione dell'età dell'universo. Famosa rimane la procedura di calcolo adottata dall'arcivescovo anglicano James Ussher nel 1658: sommando tutte le successive generazioni elencate nella Bibbia, egli fissò l'anno della creazione nel 4004 a.C. Stando a questa datazione l'universo avrebbe attualmente 5978 anni. È il caso di precisare che calcoli piú recenti differiscono da tale risultato di circa sei ordini di grandezza. Si stima, tuttavia, che il grado di approssimazione dei calcoli moderni sia di qualche miliardo di anni, a differenza di quanto fatto dall'arcivescovo Ussher, che stabilí la sua datazione entro lo scarto di un solo anno.

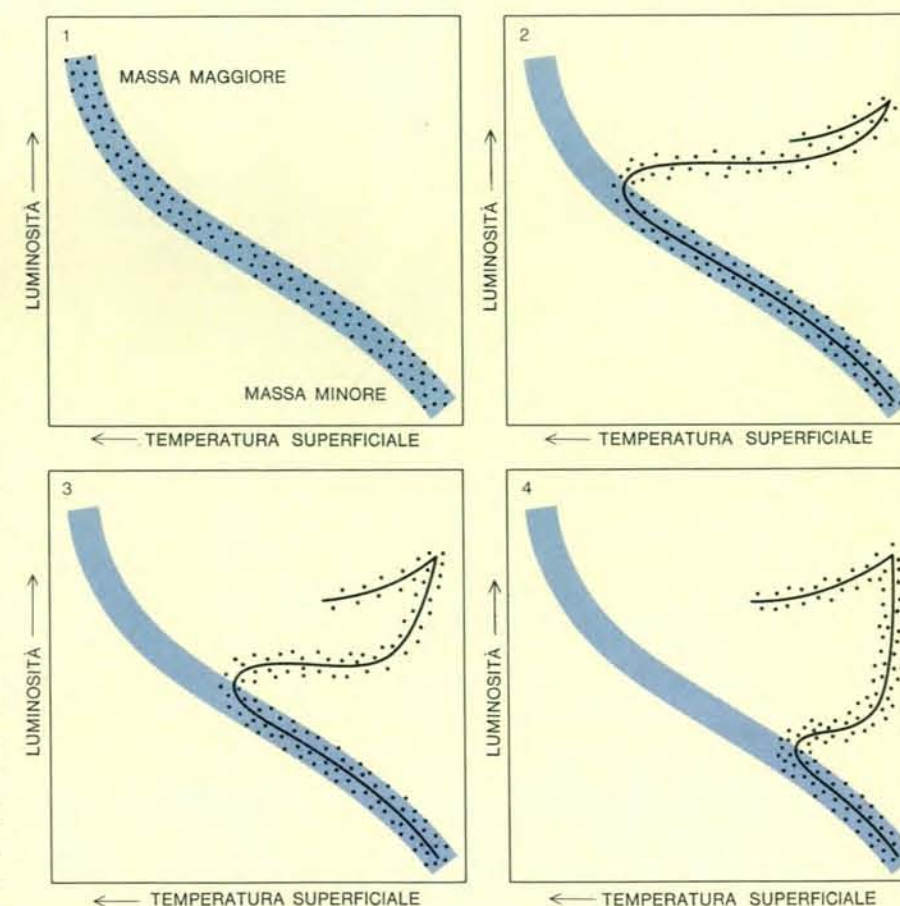
Oltre alla cosmocronologia nucleare, le due principali modalità di datazione degli eventi cosmologici si basano su misure relative all'espansione dell'universo e sulle osservazioni delle stelle appartenenti ad ammassi globulari associati con molte galassie, compresa quella cui apparteniamo (Galassia). Entrambe queste tecniche richiedono estrema precisione nella valutazione dei fenomeni astronomici.

Il primo a rendersi conto che l'universo è in espansione fu Edwin P. Hubble nel 1929. Vi è attualmente un accordo quasi generale nel fare rientrare la spiegazione dell'espansione in una qualche versione della teoria cosmologica del *big bang* o grande scoppio. Secondo questa teoria, l'universo sta tuttora esplodendo a partire da uno stato primordiale molto denso e a temperatura molto elevata. La teoria rivale dello *steady state* o stato stazionario, che postula un'età infinita, è confutata dall'osservazione del fondo di radiazione di corpo nero a tre gradi o radiazione fossile. (Si veda l'articolo *La sfera di fuoco primordiale* di P.J.E. Peebles e David T. Wilkinson, in « Le Scienze », n. 2, ottobre 1968.)

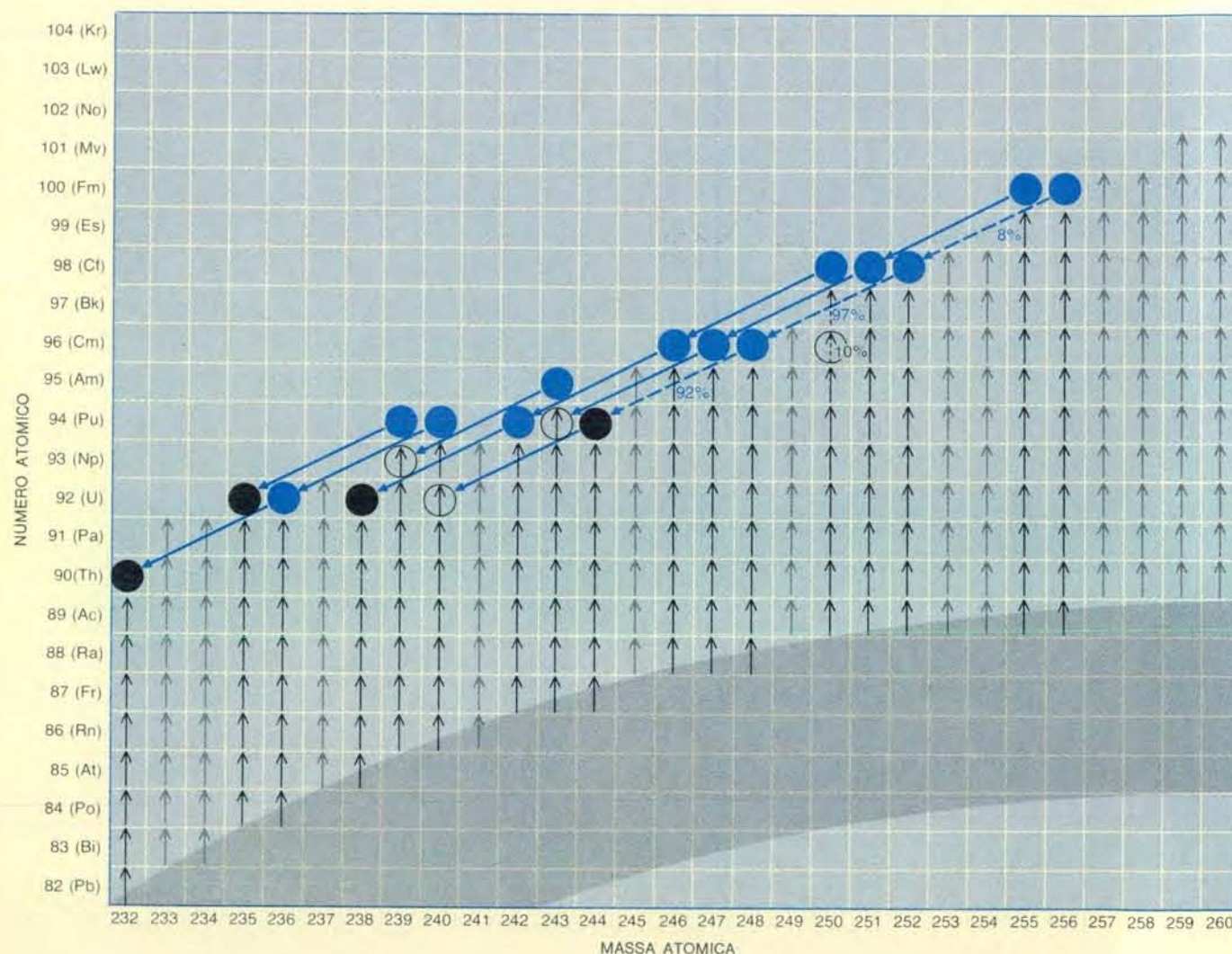
L'universo non ebbe necessariamente inizio col *big bang*. Non è infatti escluso che un tempo fosse costituito da gas rarefatto che, in seguito, si contrasse, esplose e continuerà a espandersi per sempre; d'altronde, è anche possibile che l'universo, all'epoca della sua origine, si trovasse nello stato condensato e che ora stia ritornando verso questa condizione iniziale, seguendo un ciclo che potrebbe di nuovo ripetersi all'infinito. In ogni caso, il « nostro » universo nacque al momento dell'esplosione iniziale e a questa volontaria limitazione siamo costretti dall'impossibilità di ottenere informazioni sugli eventi che la precedettero. L'età che assegnamo all'universo è misurata pertanto dall'intervallo di tempo che separa il *big bang* da oggi (*si veda l'illustrazione in alto a destra*).

Allan R. Sandage, lavorando col telescopio Hale da 5 metri sul monte Palomar, ha recentemente ricalcolato la velocità di espansione. I risultati stanno a indicare che, nell'ipotesi che la velocità di espansione si sia mantenuta costante dal momento del *big bang*, l'età che si può assegnare all'universo è di 18 miliardi di anni. Questo, che è un limite superiore per l'età dell'universo, viene talvolta indicato come « tempo di Hubble » e può essere considerato la vera età solo a condizione che la velocità di espansione non abbia subito variazioni nel tempo. Poiché la gravitazione tende a diminuire la velocità di espansione, l'universo deve essere un poco piú giovane del « tempo di Hubble ». Questa decelerazione non è stata misurata esattamente, tuttavia Sandage ne ha stabilito un limite massimo constatando che non si sono osservati quegli effetti che si sarebbero prodotti se tale valore massimo fosse stato superato. In tal modo, le sue

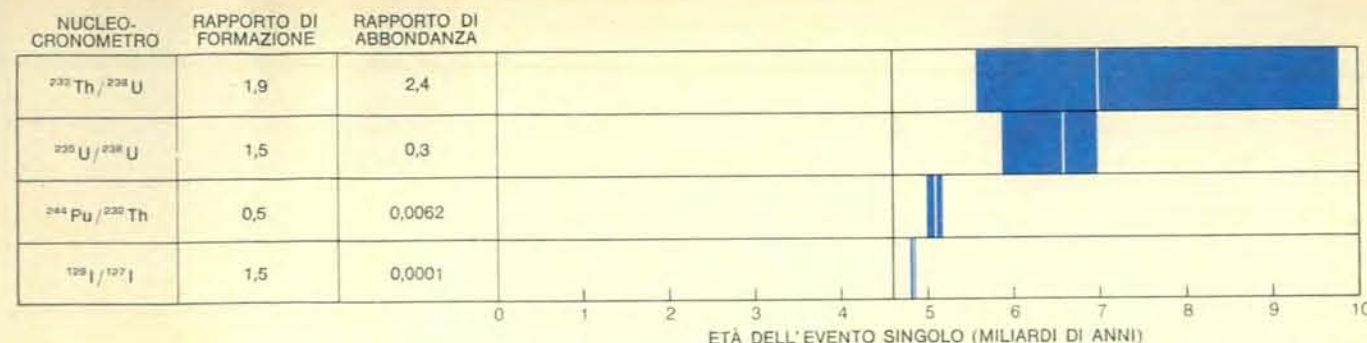
Una supernova appartenente a una galassia nella costellazione *Coma Berenices* venne fotografata (*a sinistra*), in coincidenza con la sua massima luminosità, nel maggio del 1940. Otto mesi piú tardi, la supernova appare nella fotografia a destra notevolmente affievolita. Si ritiene che gli elementi piú pesanti del bismuto si formino solo nelle supernovae. Poiché questi elementi sono radioattivi, dal loro decadimento è possibile risalire, in base ai loro tempi di dimezzamento, all'epoca di formazione e quindi all'epoca di origine delle prime supernovae. Le fotografie furono eseguite con il telescopio da 2,5 metri di Mount Wilson.

L'espansione dell'universo, misurata attraverso l'allontanamento di oggetti astronomici distanti, fornisce un metodo di datazione del *big bang*. La velocità dell'espansione può essere determinata nel punto contrassegnato « ora ». Questa velocità non può comunque, da sola, indicarci se l'universo continuerà a espandersi per sempre (*curva colorata*) o se si contrarrà di nuovo per effetto della sua stessa gravitazione (*curva in nero*). L'età massima assegnabile così all'universo oscilla tra i 10 e i 20 miliardi di anni; il valore piú probabile è 18 miliardi di anni. L'età minima è metà di quella massima. Gli eventi antecedenti il *big bang* (*linee tratteggiate*) sconfinano nel passato imperscrutabile.

L'età delle stelle in un ammasso globulare fornisce un'altra misura dell'età dell'universo. In questi diagrammi di Hertzsprung-Russell, la fascia diagonale rappresenta la sequenza principale, che descrive le caratteristiche di tutte le stelle al tempo della loro formazione (*1*). Col passare del tempo le stelle abbandonano la sequenza principale a cominciare da quelle dotate di massa maggiore nella parte superiore della fascia (*2*) e quindi via via quelle della parte inferiore (*3, 4*). Se si riesce a localizzare sulla fascia il punto di uscita, è possibile valutare l'epoca di formazione degli ammassi globulari.

osservazioni permettono anche l'individuazione del limite inferiore dell'età dell'universo: quest'ultimo non può probabilmente essere piú giovane della metà del « tempo di Hubble ». Questi calcoli sono affetti da una considerevole imprecisione: infatti il « tempo di Hubble » potrebbe variare da 10 a 20 miliardi di anni e, conseguentemente, l'età minima calcolata con questo metodo potrebbe oscillare tra 5 e 10 miliardi di anni.

Il secondo metodo astronomico di datazione dell'universo si basa sulle singolari proprietà degli ammassi globulari (si veda l'articolo *Le stelle degli ammassi globulari* di Jcko Iben, jr., in « Le Scienze », n. 26, ottobre 1970). Dai calcoli relativi all'evoluzione stellare è possibile valutare l'età di una stella a condizione di conoscere la sua massa, la sua luminosità, la sua composizione e la sua temperatura superficiale. La composizione e la temperatura superficiale possono essere dedotte dallo spettro della stella, mentre la determinazione della massa e della luminosità può, nella maggior parte dei casi, essere effettuata solo se è nota anche la distanza della stella. Gli ammassi globulari forniscono un campione unico per questi calcoli poiché tutte le stelle di un dato ammasso si formarono pressappoco nello stesso momento e a partire dal medesimo materiale. Inoltre, la loro distanza rispetto a noi è approssimativamente identica. Se si pone in un grafico la temperatura superficiale di un gruppo di stelle in funzione della loro luminosità, l'insieme dei punti corrispondenti alle stelle giovani, alimentate dalla fusione nucleare dell'idrogeno, individua una striscia diagonale chiamata sequenza principale; le stelle con massa piú grande

Rappresentazione schematica della formazione di quattro elementi usati come nucleocronometri. I cronometri (*cerchi neri pieni*) sono: torio-232, uranio-235, uranio-238 e plutonio-244. Il processo *r* o processo rapido (*striscia grigia*) produce nuclei aventi un eccesso di neutroni; questi nuclei decadono per emissione beta, fino a portarsi nella regione dove il rapporto tra protoni e neutroni diventa stabile. Nel decadimento beta, la massa atomica non varia, mentre il numero atomico aumenta di un'unità. Gli schemi di decadimento beta che contribuiscono alla formazione di nucleocronometri sono indicati da frecce in nero. Anche altri nuclei decadono per emissione beta; i relativi schemi sono indicati da frecce in grigio. Nella regione stabile rispetto all'emissione beta, predomina il decadimento alfa; in questo processo la massa atomica diminuisce di quattro unità e il numero atomico di due. Gli emettitori alfa sono individuati da cerchi colorati e i loro schemi di decadimento sono indicati da frecce colorate. Un limitato numero di nuclei decade talvolta per fissione spontanea e viene perciò rimosso da questa regione di massa. Gli schemi di decadimento alfa o beta della rimanente frazione di nuclei sono indicati dalle frecce tratteggiate, in corrispondenza alle quali compare la percentuale di ciascun nucleo che contribuisce alla formazione di un nucleocronometro. Ciascun cronometro è costituito dal nucleo formatosi, alla sua propria massa atomica, e dai prodotti di decadimento dei suoi progenitori aventi massa superiore. Poiché ogni massa viene prodotta in abbondanza circa uguale, le velocità di formazione possono essere determinate sommando il numero dei progenitori. Per esempio, l'uranio-238 è un prodotto finale comune a tutti i nuclei di massa 238, 242 e 246 e al 10 per cento dei nuclei di massa 250, per cui la sua velocità di formazione è 3,1 (cioè tre piú un decimo). Un cronometro (plutonio-244) è tra i progenitori di un altro cronometro (torio-232).

NUCLEO-CRONOMETRO	RAPPORTO DI FORMAZIONE	RAPPORTO DI ABBONDANZA
$^{232}Th/^{238}U$	1,9	2,4
$^{235}U/^{238}U$	1,5	0,3
$^{244}Pu/^{232}Th$	0,5	0,0062
$^{129}I/^{127}I$	1,5	0,0001

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
ETÀ DELL'EVENTO SINGOLO (MILIARDI DI ANNI)

Quattro periodi della storia dell'universo sono misurati da quattro coppie di nucleocronometri. I rapporti di formazione sono stimati in base alla conoscenza teorica della nucleosintesi; i rapporti di abbondanza sono calcolati attraverso l'abbondanza degli elementi osservata attualmente nelle meteoriti, ma viene a essi attribuito il significato di rapporti esistenti all'epoca in cui il sistema solare si condensò. Da questi dati può essere desunta un'età dell'evento singolo per ciascuna delle coppie (*linee bianche verticali*), benché in taluni casi il margine di errore delle misure sia molto ampio (*strisce colorate*). I disaccordi tra i valori delle età attribuite all'evento singolo sono imputabili alle differenze del tempo di dimezzamento dei nucleocronometri. Tra i nucleocronometri a vita lunga, come l'uranio-238, può verificarsi che i nuclei sopravvivano fin dalle piú antiche supernovae. I nucleocronometri che decadono rapidamente, come lo iodio-129, devono comunque essere attualmente rappresentati dai nuclei formatisi appena prima della formazione del sistema solare, circa 4,6 miliardi di anni fa (*linea nera verticale*).

sono disposte nella regione luminosa-calda, quelle con massa inferiore nella regione fredda-oscura. Questo che abbiamo descritto è il diagramma di Hertzsprung-Russell, o H-R, così chiamato dal nome dei suoi ideatori, Ejnar Hertzsprung e Henry Norris Russell. Quando l'idrogeno nel nucleo di una stella è esaurito, quest'ultima esce dalla sequenza principale, diventando ben presto una gigante rossa. Le stelle di massa piú grande sono molto piú pronte nell'abbandonare la sequenza principale rispetto a quelle piú piccole. Data una popolazione di stelle, tutte formatesi nella stessa epoca, è pertanto possibile valutarne l'età semplicemente localizzando, sul diagramma H-R, il punto di uscita delle stelle dalla sequenza principale (*si veda l'illustrazione a pagina 33 in basso*).

Jcko Iben jr. e Robert Rood hanno recentemente calcolato che l'età di formazione degli ammassi globulari è di 13 ± 3 miliardi di anni, valore che si accorda con quello di 9-18 miliardi di anni desunto dalla velocità di espansione dell'universo. Naturalmente l'età effettiva dell'universo deve essere maggiore di quella degli ammassi globulari, ma si pensa tuttavia che gli ammassi si siano formati assai meno di un miliardo di anni dopo l'evento del *big bang*.

Come nel caso della determinazione del « tempo di Hubble », anche questi calcoli sono caratterizzati da un rilevante margine di imprecisione, le cui fonti principali stanno nei calcoli teorici sull'evoluzione stellare e nella determinazione della composizione delle stelle. A causa dei limiti insiti in questi metodi, il ricorso a una terza tecnica indipendente può fornire un importante mezzo di conferma. Questa terza tecnica si basa sull'impiego dei nuclei radioattivi.

Nella palla di fuoco primordiale che noi facciamo coincidere con la nascita dell'universo, solo gli elementi piú leggeri – idrogeno, elio e, forse, piccole quantità di litio – avrebbero potuto formarsi. I restanti elementi furono sintetizzati piú tardi, nelle stelle.

Le stelle della sequenza principale, ivi comprese virtualmente tutte le stelle formatesi a breve distanza dal *big bang*, sono alimentate dalla fusione nucleare di idrogeno in elio. Come abbiamo visto, è l'esaurimento dell'idrogeno contenuto nel nucleo la causa per cui una stella abbandona la sequenza principale. Quando la stella diventa una gigante rossa, il suo involucro esterno si espande, ma nello stesso tempo il nucleo si contrae gravitazionalmente e si surriscalda sempre piú, fino a che si innesca una nuova reazione di fusione: la trasformazione dell'elio in carbonio. Alla fine, anche l'elio si esaurisce lasciando la stella col suo nuovo nucleo di carbonio.

Gli eventi successivi dipendono dalla massa della stella. Una stella avente una massa minore di quattro volte la massa del Sole diventerà una nebulosa planetaria e darà luogo alla formazione di una nana bianca. Una stella con massa compresa tra quattro e otto volte la massa del Sole esploderà probabilmente come supernova quando avrà inizio la fusione nel nucleo di carbonio. In questo caso, dopo l'esplosione, può rimanere oppure no un denso nucleo formato da neutroni. Questo residuo, se esiste, è una stella di neutroni piuttosto che una nana bianca; i pulsar, osservati nei residui di qualche supernova, sono ritenuti essere stelle di neutroni (si veda l'articolo *I pulsar* di A. Hewish, in « Le Scienze », n. 5, gennaio 1969).

Anche una stella con massa equivalente a piú di otto masse solari è probabilmente destinata a diventare una supernova. Quando una stella di questo tipo esplode, quasi certamente produce un residuo che può essere una stella di neutroni oppure anche un « buco nero » (si veda l'articolo « *I buchi neri* » di R. Penrose, in « Le Scienze », n. 48, agosto 1972). È proprio in seguito all'esplosione di queste stelle di massa imponente che traggono origine gli elementi compresi tra il carbonio e il ferro. Il ferro è comunque l'elemento che chiude definitivamente questa sequenza, poiché le reazioni di fusione implicanti ferro non possono alimentare processi stellari; trasformazioni che avvengono a questo livello assorbono piú energia di quanta ne liberino. Il ferro, e taluni altri elementi a esso strettamente correlati, rappresentano quindi il prodotto finale del processo nucleare globale donde le stelle traggono la loro energia.

Non dovrebbe apparire strano che tutti gli elementi piú pesanti si siano formati nel corso di eventi che, a paragone col numero di stelle, sono piuttosto rari. Infatti su circa 100 miliardi di stelle nella Galassia, solo meno di un miliardo di supernovae ha probabilmente avuto modo di formarsi. D'altra parte l'universo è tuttora costituito per piú del 98% da idrogeno ed elio. Da tutto ciò appare evidente che, se le supernovae costituiscono un fenomeno relativamente raro, altrettanto rari saranno gli elementi che da esse hanno tratto origine.

Gli elementi piú pesanti del ferro si formano originariamente per cattura di neutroni da parte dei nuclei del ferro e degli elementi a esso vicini. La cattura avviene secondo due modalità: un processo lento (detto processo *s* da

slow, lento), o un processo rapido (*r*).

Il processo *s* ha luogo nell'involucro delle giganti rosse. In questa regione, i neutroni penetrano nei nuclei uno alla volta in periodi molto lunghi, e in tal modo possono formarsi solo nuclei relativamente stabili. Gli isotopi che decadono rapidamente si disintegrano prima che un altro neutrone possa essere assorbito. Per tale ragione, il processo *s* si conclude col piombo e il bismuto. Tutti gli elementi piú pesanti sono in qualche misura radioattivi e quelli che seguono immediatamente il piombo e il bismuto sono instabili.

Il processo *r* interviene presumibilmente solo nelle supernovae ed è, con tutta probabilità, attivo nella regione dell'esplosione immediatamente esterna al residuo formato da una stella di neutroni o da un « buco nero », dove il flusso di neutroni è intenso. Data questa circostanza, i neutroni possono essere assorbiti dai nuclei in rapida successione, per cui vengono collegate regioni di forte instabilità nucleare. Si presume che tutti gli elementi piú pesanti del bismuto si siano formati secondo questa modalità.

I nuclei prodotti inizialmente attraverso il processo *r* sono troppo saturi di neutroni per poter essere stabili o a vita lunga. Di conseguenza, essi si portano immediatamente verso regioni piú stabili attraverso il decadimento beta. Nel corso di questo processo, un neutrone emette un elettrone (e un antineutrino) trasformandosi in protone; il risultato è che la massa atomica si mantiene quasi costante, mentre il numero atomico aumenta di una unità. Il decadimento beta prosegue fino al raggiungimento di un valore di stabilità nel rapporto tra neutroni e protoni. Per esempio, il piombo-232, che si forma nel processo *r* e che possiede 26 neutroni in eccesso rispetto all'isotopo stabile piombo-206, decade fino al torio-232, attraverso 8 emissioni beta.

Gli elementi che attualmente forniscono i piú efficaci nucleocronometri si formano nel processo *r*. Poiché tale processo opera presumibilmente solo nelle supernovae, se si potesse stabilire la data di origine di questi elementi si arriverebbe di fatto ad assegnare l'età alle supernovae. Anche la maggior parte degli elementi compresi tra il carbonio e il ferro si formano nelle supernovae e, data questa circostanza, si può ben dire che tale metodo fornisce veramente l'età degli elementi. In aggiunta, grazie a questi calcoli, si può anche arrivare ad assegnare un'età all'intero universo. Le stelle di grande massa, che si condensarono quando si formarono le galassie, devono essere diventate supernovae assai presto, poco dopo il *big bang*. Attribuire una datazione a queste prime supernovae equivarrebbe approssimativamente a fissare l'età delle galassie e quindi dell'universo. Anche se l'evoluzione di queste stelle non fu cosí rapida come si presume, è evidente che la data di origine delle piú antiche supernovae individua un limite inferiore dell'età dell'universo.

Per poter compiere questi calcoli, non è necessario conoscere l'effettiva abbondanza degli elementi nel presente o in qualunque epoca del passato. È richiesta soltanto la conoscenza del rapporto che intercorre attualmente tra una coppia opportunamente scelta di elementi (« rapporto di abbondanza ») e il rapporto in cui gli stessi si trovavano quando cominciarono a formarsi (« rapporto di formazione »).

I « rapporti di abbondanza » sono determinati per mezzo di accurate misure sperimentali. Le rocce terrestri, nonostante siano sostanzialmente costituite dallo stesso materiale presente nel sistema solare, non si prestano a fornire campioni adatti. Nel corso dei 4,6 miliardi di anni da quando si condensò il sistema solare, le rocce della Terra si sono formate e riformate parecchie volte. In seguito al frazionamento chimico, la loro composizione si è alterata e questa circostanza le rende non piú rappresentative del materiale mediamente incorporato nel sistema solare. La maggior parte dei campioni proviene dalle meteoriti, che sono rimaste indisturbate durante l'intera storia del sistema solare; recentemente, si è fatto ricorso a materiale proveniente dalla Luna.

I campioni vengono per prima cosa preparati chimicamente, al fine di isolarne gli elementi opportuni. Poiché le quantità dei vari tipi di elementi sono estremamente ridotte, bisogna evitare con molta cura ogni forma di conta-

Lo spettrometro di massa è lo strumento che permette di calcolare i rapporti di abbondanza dei nucleocronometri. Un campione di elevata purezza dell'elemento sotto esame viene in primo luogo isolato attraverso una separazione chimica. Il campione viene quindi ionizzato sotto vuoto e gli ioni carichi positivamente (che contengono i nuclei) vengono accelerati per mezzo di una serie di elettrodi. Un campo magnetico devia il fascio di ioni, in modo che solo quelli aventi una certa massa possano raggiungere l'elettrodo di misura, dove la loro presenza viene rivelata e la loro corrente amplificata dall'elettrodo moltiplicatore. Gli ioni dotati di massa maggiore e quindi di maggior quantità di moto (massa × velocità) non subiranno una deviazione sufficiente affinché possano raggiungere l'elettrodo di misura; quelli di massa piú piccola saranno deviati troppo. Variando l'intensità del campo magnetico, l'abbondanza di ciascun isotopo viene misurata in successione, producendo uno spettro di massa. Lo spettrometro di massa permette quindi di separare sostanze identiche da un punto di vista chimico.

minazione. Il campione viene quindi analizzato con uno spettrometro di massa, strumento che svolge la funzione di separare gli elementi e i loro isotopi, in base al rapporto tra la loro massa e la loro carica (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*).

Il « rapporto di formazione » deve essere calcolato per via teorica. Nelle regioni caratterizzate dai cosiddetti « numeri magici » di neutroni (2,8,20,28,50, 82,126, e probabilmente 184) cui corrispondono nuclei straordinariamente stabili, il processo *r* produce un'abbondanza approssimativamente uguale di ciascuna massa atomica. Il fatto che le abbondanze iniziali sono circa uguali può essere vantaggiosamente sfruttato nel calcolo del « rapporto di produzione » dei nuclei molto pesanti, poiché in questa regione piú di un singolo numero di massa contribuisce all'abbondanza di ciascuno dei nucleocronometri. I contributi multipli sono un risultato del decadimento alfa nel corso del quale un nucleo emette una particella alfa, o nucleo di elio, diminuendo la sua massa atomica di quattro unità e il suo numero atomico di due unità. Molti degli elementi piú pesanti fungono da progenitori, decadendo fino a ritrovarsi alla fine nella veste di nucleocronometri. Un cronometro decade secondo un meccanismo tale per cui alla fine esso contribuisce all'abbondanza di un altro cronometro. Poiché numerose masse atomiche contribuiscono all'abbondanza di ciascuno di questi nucleocronometri, viene ridotto l'effetto che provoca gli scostamenti da una abbondanza media pressappoco uguale (*si veda l'illustrazione a pagina 34*).

I cronometri che rivestono piú interesse in questa regione di massa sono il torio-232, l'uranio-235, l'uranio-238 e il plutonio-244. I loro rapporti di formazione possono essere calcolati semplicemente sommando il numero dei loro progenitori. Per esempio, l'uranio-123 ha progenitori di massa 238, 242 e 246 e riceve il 10 per cento dei prodotti di decadimento del progenitore di massa 250 (il resto di questi prodotti si fissiona spontaneamente). Il totale è pertanto 3,1. Il plutonio-244 ha per progenitori al 100% quelli di massa 244, per progenitori al 92% quelli di massa 248, all'89% quelli di massa 252 e al 7% quelli di massa 256, per un totale di 2,9. Il torio-232 viene prodotto dai nuclei di massa 232, 236 e 240 e da progenitori che contribuiscono alla massa 244, per un totale di 5,9. Infine l'uranio-235 ha questi sei progenitori: 235, 239, 243, 247, 251 e 255.

I « rapporti di formazione » di questi elementi possono ora venire espressi in modo semplice. Il rapporto tra torio-232 e uranio-238 è uguale a 5,9 diviso 3,1, cioè 1,9. Il rapporto tra plutonio-244 e torio-232 è uguale a 2,9 diviso 5,9, cioè 0,5. Nel caso del rapporto tra uranio-235 e uranio-238, il suo valore, calcolato con questo metodo, è uguale a 6 diviso 3,1, cioè 1,9; poiché i nuclei con numero di massa dispari vengono piú facilmente distrutti in seguito a cattura neutronica, questo rapporto viene comunque ritoccato a 1,5.

Il modello dell'evento singolo relativo alla nucleosintesi è basato sul decadimento del torio-232 (*linea in colore*) e dell'uranio-238 (*linea in nero*). Si fa l'ipotesi che questi nuclei si siano formati nel rapporto 1,9:1; il loro attuale rapporto di abbondanza è di 4:1. Dalla conoscenza della loro velocità di decadimento, è possibile calcolare che un evento singolo, verificatosi sette miliardi di anni fa, avrebbe potuto produrre questi rapporti di abbondanza. Quando si formò il sistema solare (*linea tratteggiata*), il rapporto di abbondanza era di 2,4:1. Si sa oggi che questo modello è errato, tuttavia esso fornisce una dimostrazione idealizzata dei metodi di datazione nucleare con isotopi radioattivi.

Un modo assai semplice di mostrare come questi rapporti possono essere usati per determinare l'età degli elementi si basa sull'ipotesi che tutti gli elementi si formarono in un unico evento. Benché si sappia che questa ipotesi è sbagliata, essa fornisce ugualmente un utile modello idealizzato per la datazione dei processi nucleari (*si veda l'illustrazione qui sopra*).

Per esempio, usando come cronometro la coppia torio-232 e uranio-231 si può mostrare sperimentalmente che l'attuale rapporto di abbondanza è circa 4,0. Il rapporto di formazione calcolato è di 1,9; dal tempo di dimezzamento degli elementi è possibile stabilire che il tempo richiesto per il verificarsi di tale cambiamento nel rapporto è di sette miliardi di anni, che corrisponde all'età dell'ipotetico evento singolo.

In pratica, il calcolo non dovrebbe essere eseguito proprio in questo modo. Invece di ricorrere direttamente all'attuale rapporto di abbondanza è piú conveniente ricavare da esso l'abbondanza relativa all'epoca in cui il sistema solare si condensò, 4,6 miliardi di anni fa. In questo caso il rapporto era allora di 2,4 e l'intervallo di tempo tra il singolo evento iniziale e la formazione del sistema solare è di 2,4 miliardi di anni. Sommando a questo tempo l'età del sistema solare si arriva all'identico risultato di sette miliardi di anni. Questa procedura riveste maggiore importanza quando vengano usati cronometri a piú breve tempo di dimezzamento.

L'ipotesi dell'evento singolo non è assolutamente plausibile poiché è molto improbabile che tutte le supernovae di due miliardi di anni fa siano esplose contemporaneamente. Si può dimostrare che l'ipotesi è errata poiché ciascuna delle numerose coppie di nucleocronometri fornisce una data diversa dell'evento singolo. Per la verità, questi cronometri con tempo di dimezzamento relativamente breve si sarebbero semplicemente disintegrati, se la sola circostanza che ne determinò la formazione si fosse verificata miliardi di anni prima della formazione del sistema

solare. Per tale motivo è necessario l'ausilio di modelli piú complessi.

Piú di dieci anni fa William A. Fowler e Fred Hoyle usarono torio-232, uranio-235 e uranio-238 per determinare la scala del tempo relativa alla nucleosintesi. Col solo uso di questi nucleocronometri, non fu però possibile eliminare il modello a evento singolo. Negli ultimi anni, comunque, sono state ideate tecniche che prevedevano l'impiego di due nuovi nucleocronometri. Si tratta dello iodio-129 e del plutonio-244 e il fatto di averne osservato la presenza nel sistema solare non può accordarsi con l'ipotesi di un singolo evento nucleosintetico.

Le misure relative all'abbondanza dello iodio-129 e del plutonio-244 richiedono che si faccia uso di una certa accortezza. I tempi di dimezzamento di entrambi questi elementi sono assai inferiori all'età del sistema solare; in qualunque quantità fossero stati presenti a quel tempo, tale quantità dovrebbe al presente essersi ridotta virtualmente a zero in seguito a decadimento radioattivo. L'abbondanza attuale non dovrebbe essere uguale a zero, poiché essa tende ad annullarsi solo asintoticamente, ma è talmente piccola da non potersi probabilmente misurare.

Ricercatori del Laboratorio scientifico di Los Alamos e della General Electric hanno recentemente identificato tracce di plutonio-244 presenti in natura.

Il plutonio e lo iodio come cronometri non sono quindi di per sé accessibili, a differenza dei loro prodotti di decadimento. Lo iodio-129 decade (per emissione beta) a xeno-129, stabile. Conseguentemente, se una data quantità di iodio-129 era presente nella materia donde si formò una meteorite 4,6 miliardi di anni fa, un'uguale quantità di xeno-129 dovrebbe venire individuata oggi, nella stessa meteorite. Analogamente possiamo attenderci la presenza di molti altri isotopi dello xeno, che possono venire separati tramite la spettrometria di massa, in modo che la presenza un tempo di iodio-129 nella meteorite verrebbe oggi a essere testimoniata da un eccesso di xeno-129.

Modelli ipotetici di nucleosintesi postulano tre possibili distribuzioni di supernovae durante la fase iniziale della storia dell'universo. Tutti e tre i modelli assumono la stessa « età media » degli elementi, ma includono differenti « tassi medi » di formazione degli elementi. Se il numero di supernovae si è mantenuto abbastanza costante e se le fluttuazioni sono state simmetriche (*curva in alto*), allora l'età media è approssimativamente uguale a metà dell'età totale del processo nucleosintetico. Se il numero di supernovae fu comunque particolarmente elevato in un periodo iniziale (*curva al centro*), allora l'universo è più giovane di quanto suggerirebbe un modello a tasso costante. Un basso tasso di comparsa iniziale (*curva in basso*) dà luogo a un'età complessiva leggermente maggiore. Quest'ultimo modello è in disaccordo con le osservazioni ed è perciò da scartare.

John H. Reynolds e i suoi collaboratori presso l'Università della California a Berkeley furono i primi a individuare questo eccesso di xeno-129 e a provare che la sua formazione è dovuta al decadimento dello iodio-129. Ricorrendo a un metodo ingegnoso, essi furono in grado di determinare il rapporto tra lo iodio-129 e l'isotopo stabile iodio-127 esistente all'epoca di formazione della meteorite, o, piú precisamente, quando questa si fu raffreddata a sufficienza per potere trattenere il gas xeno. Per ricavare questo rapporto, Reynolds irradiò il campione con neutroni, in modo che i nuclei di iodio-127, per cattura di un elettrone ciascuno, si trasformassero in iodio-128 che decade, in 25 minuti, a xeno-128. In tal modo, l'abbondanza di iodio-127 potrebbe venire messa in relazione con l'eccesso di xeno-128. Successivamente Reynolds estrasse lo xeno scaldando il campione per stadi successivi osservando lo spettro di massa a ogni singolo stadio. A molte temperature venne estratto solo xeno di origine normale. Lo xeno-128 e lo xeno-129 presenti in eccesso comparvero contemporaneamente quando alla fine furono estratti, e questa circostanza dimostra che i depositi originari dei due isotopi dello iodio avevano una localizzazione comune. Fu pertanto possibile escludere lo xeno di origine normale dai prodotti di decadimento dello iodio. In base al rapporto tra i due isotopi in eccesso xeno-128 e xeno-129, Reynolds riuscí a risalire al rapporto esistente tra gli stessi isotopi all'epoca della formazione del sistema solare.

Le età dell'universo fornite dai tre esistenti metodi di datazione sono in accordo abbastanza buono. Il valore desunto dalle misure relative alla velocità di fuga delle galassie rappresenta la stima giudicata più valida, tuttavia esso potrebbe variare da 5 a 20 miliardi di anni. Se si accettano solamente quelle età in accordo con tutti e tre i metodi (*striscia in colore*) l'origine dell'universo deve risalire a 10-15 miliardi di anni fa.

Anche l'identificazione del plutonio-244 come cronometro implica isotopi dello xeno. Il plutonio-244 decade per emissione alfa con tempo di dimezzamento di 82 milioni di anni. Un nucleo su mille, tuttavia, invece di seguire questo schema di decadimento, si fissiona spontaneamente. Tra i prodotti di fissione figura lo xeno, ma solo sotto forma dei quattro isotopi pesanti xeno-131, xeno-132, xeno-134 e xeno-136. Questi isotopi vengono anche prodotti in seguito alla fissione di altri nuclei, ma in proporzioni determinate e caratteristiche di ciascuna sostanza fissionabile. È pertanto possibile identificare il nucleo che ha subito la fissione esaminando lo spettro di massa degli isotopi dello xeno.

Spettri isotopici anomali dello xeno, che indicavano la presenza di un componente sconosciuto nei prodotti di fissione, furono scoperti, all'interno di meteoriti, da P.K. Kuroda, dell'Università dell'Arkansas. Gerald J. Wasserburg e i suoi collaboratori presso l'Istituto di tecnologia della California scoprirono nel 1969 che gli isotopi pesanti dello xeno in eccesso erano correlati con tracce fossili di fissione nelle meteoriti. Queste tracce testimoniano del danno arrecato alla struttura cristallina dal contraccolpo prodotto dai frammenti del nucleo. A quel tempo non si conosceva lo spettro isotopico dello xeno relativo alla fissione del plutonio-244, ma ciononostante, questo nucleo divenne il solo candidato plausibile. Numerosi ricercatori, me compreso, cominciarono a indagare le sue possibilità applicative come cronometro. Questo problema non fu risolto che nel 1971, 10 anni dopo le scoperte di Kuroda, quando il gruppo di Reynolds riuscí a esaminare lo spettro isotopico dello xeno prodotto per fissione di un campione noto di plutonio-244.

Dall'osservazione dei prodotti di fissione del plutonio-244 in una meteorite, alla formulazione di un rapporto di abbondanza per il plutonio-244 e il torio-232, esiste un collegamento gravido di incertezze. Il valore dell'abbondanza deve essere rappresentativo dell'intero sistema solare, eppure esso potrebbe essere stato sostanzialmente alterato da un frazionamento chimico dei componenti della meteorite. Il valore assegnato è di 0,0062 ma esso rappresenta un'ottima stima piuttosto che un dato definitivamente acquisito.

Nel caso dello iodio-129, devono essere effettuate speciali misure per valutare il rapporto di formazione. Lo iodio-129 (53 protoni, 76 neutroni) è vicino al numero magico di neutroni 82 e, di conseguenza, la distribuzione degli isotopi prodotti per cattura neutronica è ben lontana dall'essere uniforme. Si rende perciò necessario determinare la sua velocità di formazione per interpolazione, sulla base di velocità di formazione note e relative a isotopi stabili nelle immediate vicinanze, come il tellurio-128 e il tellurio-130.

Questa procedura è generalmente richiesta quando si debbano determinare le velocità di formazione di tutti i nuclei radioattivi piú leggeri. Un'eccezione degna di segnalazione è rappresentata da una cronologia elaborata da Donald D. Clayton della Rice University, relativa alla coppia renio-187 e osmio-187, i nucleocronometri a vita piú lunga. Per questi elementi è stato dimostrato che il rapporto di formazione è legato al rapporto tra le sezioni d'urto di cattura neutronica dei nuclei. La sezione d'urto di cattura fornisce la misura della prontezza con cui il nucleo assorbe un neutrone. Sfortunatamente, le sezioni d'urto non sono ancora state misurate e le stime teoriche utilizzate introducono rilevanti incertezze nelle cronologie derivate da questa coppia.

Usando tutti questi nucleocronometri è possibile affrontare il problema della determinazione dell'età dell'universo in un modo piú raffinato di quanto accada impiegando il modello dell'evento singolo. Quando si prendono in considerazione piú eventi, l'assegnazione di un'età può essere effettuata determinando quando la somma dei prodotti radioattivi superstiti da ciascuna supernova soddisfa l'abbondanza osservata all'epoca di formazione del sistema solare. Si può fare l'ipotesi che i prodotti di ciascuna supernova si siano mescolati nel gas interstellare a causa della rotazione della Galassia e che il sistema solare si sia condensato a partire da questo gas. Noi non sappiamo, comunque, quante supernovae esplosero in epoche diverse nel corso della storia galattica; una stima, in questo senso, può solo scaturire da osservazioni compiute su altre galassie. Le variazioni del tasso al quale le supernovae esplodono avrebbero evidentemente un effetto sull'età indicata dai nucleocronometri. Se, per esempio, ci fosse sta-

La probabile distribuzione delle supernovae è costruita confrontando le informazioni fornite dai nucleocronometri a vita lunga e a vita breve. Il tasso di comparsa medio complessivo è quello dato dalle coppie torio-232/uranio-238 e renio-187/osmio-187 (*zona tratteggiata verticalmente*). Poiché questo tasso è piú elevato di quello indicato dalla coppia a vita piú breve uranio-235/uranio-238 (*zona tratteggiata orizzontalmente*), se ne deduce che il tasso di comparsa delle supernovae deve essere stato alto all'inizio della storia dell'universo, per poi decrescere. Gli alti tassi forniti dai cronometri a vita molto breve iodio e plutonio (*zona tratteggiata diagonalmente*) suggeriscono l'esistenza di un altro picco nel numero di supernovae, appena prima della formazione del sistema solare. La curva risultante permette di assegnare all'universo un'età di 10 miliardi di anni. Tuttavia, a causa dei margini di incertezza nei calcoli, non si può escludere dai ragionamenti la possibilità che il tasso di comparsa delle supernovae sia rimasto costante. Assumendo una velocità costante ne deriva un'età di circa 11 miliardi di anni. Il diagramma non è in scala; le fluttuazioni nel numero di supernovae sono state notevolmente esagerate, per ragioni di chiarezza.

to un numero straordinariamente grande di supernovae poco prima della formazione del sistema solare, allora i cronometri a vita lunga, come l'uranio-238, indicherebbero un'età troppo giovane per l'universo; l'abbondanza osservata non sarebbe un risultato della velocità di decadimento, ma una conseguenza della velocità di formazione.

Un modo di affrontare questo problema consiste nell'individuare un modello per il numero relativo di supernovae presenti durante la storia della Galassia. Una possibilità in questo senso è fornita dal modello dell'evento singolo, ma vi sono molti altri candidati. Il modello scelto viene sperimentato per verificare se può fornire i rapporti di abbondanza osservati da tutte le coppie di cronometri.

Wasserburg e il sottoscritto hanno sviluppato una metodologia relativa alla cosmocronologia nucleare che è indipendente dalla scelta di modelli. Usando le diverse scale di tempo dei differenti cronometri per determinare il numero relativo di supernovae in ciascun periodo, i modelli validi vengono ricavati dagli stessi cronometri. Per esempio, ogni modello valido deve includere alcune nucleosintesi in un intervallo di poche centinaia di milioni di anni dalla formazione del sistema solare, altrimenti non potrebbe spiegare la presenza di prodotti di decadimento dello iodio-129 e del plutonio-244. Questa condizione da sola è sufficiente a escludere un modello di evento singolo in cui gli elementi si siano formati sette miliardi di anni fa.

Ricavando il modello dai dati disponibili, noi possiamo valutare non solo la scala di tempo dell'universo, ma anche il tasso di comparsa delle supernovae nella Galassia (in effetti qui non intendiamo le supernovae di per sé ma ci riferiamo semplicemente alla velocità del processo *r*. Come abbiamo visto, si ritiene comunque che il processo *r* avvenga solo nelle supernovae).

Poiché nella Galassia si sono succedute circa un miliardo di supernovae, è piú agevole usare tecniche statistiche che non ricorrere alla somma degli effetti di ciascun evento. Ogni distribuzione di supernovae possiede un tasso medio e un'età media. Esiste anche un tempo oltre il quale le supernovae non potrebbero fornire ulteriormente materiale al sistema solare. Infine, i nuclei piú antichi devono essere piú vecchi dell'età media degli elementi.

Dai dati forniti dai nucleocronometri è possibile pervenire all'età media e inoltre trovare in quale rapporto stanno il tasso di comparsa delle supernovae in certi tempi e il tasso medio di comparsa delle supernovae. Questi calcoli sono resi possibili dalle differenze nelle durate dei cronometri. Un nucleo con un certo periodo di dimezzamento non può essersi formato prima di un intervallo corrispondente a qualche multiplo del suo tempo di dimezzamento dal momento in cui si condensò il sistema solare, altrimenti non sarebbe presente in quantità misurabili nella materia del sistema solare. Perciò l'abbondanza del nucleo fornisce il tasso di comparsa media delle supernovae, mediata su alcuni tempi di dimezzamento di quel nucleo. Si può dimostrare che l'età media degli elementi che hanno prodotto una particolare coppia di cronometri è la stessa di un ipotetico evento singolo che ha prodotto quella coppia.

I cronometri a vita molto lunga, come renio-187, torio-232, e, forse, uranio-238, esistono per una durata uguale o superiore a quella dell'intera nucleosintesi. Il tasso medio con cui le supernovae concorrono alla produzione di questi nuclei è pertanto il tasso medio di comparsa delle supernovae nella Galassia durante la sua storia. Inoltre, l'età media, o relativa al singolo evento, di questi nuclei coincide con l'età media degli elementi. Ovviamente, le età fornite dalla coppia torio-232 e uranio-238 e quelle fornite dalla coppia renio-187 e osmio-187 dovrebbero essere le stesse. La stima giudicata piú valida fornita dalla coppia torio-uranio è 2,4 piú 4,6 cioè 7 miliardi di anni, mentre l'età della coppia renio-osmio è 3,5 piú 4,6 cioè 8,1 miliardi di anni. Considerando il margine di errore di questi calcoli, bisogna comunque rilevare che il disaccordo non è molto rilevante. Le variazioni nel tasso di comparsa delle supernovae possono essere evidenziate confrontando i tassi forniti dai cronometri a vita piú breve con quelli forniti dai nuclei stabili a vita lunga. I cronometri a vita brevissima portano informazioni circa il periodo appena antecedente la formazione del sistema solare; confrontando questo tasso con quello indicato dagli elementi a vita lunghissima è possibile desumere se il tasso di nucleosintesi fu superiore o inferiore rispetto alla media, quando il sistema solare si condensò. Poiché ci sono due cronometri a vita breve (iodio-129 e plutonio-244), noi possiamo determinare non solo il tasso relativo a questo tempo, ma anche il tempo tra l'ultimo evento nucleosintetico e la formazione degli oggetti nel sistema solare. Si è trovato che questo intervallo è compreso tra 100 e 200 milioni di anni.

Fatto curioso, questo periodo è paragonabile al tempo di rotazione della Galassia. Tale coincidenza è stata osservata, oltre che da me, anche da H. Reeves di Parigi, e da A.G.W. Cameron dell'Università di Harvard, che, indipendentemente, fecero l'ipotesi che i nucleocronometri possano fornire indirettamente una misura della rotazione della Galassia. Nella teoria dell'onda di densità delle galassie a spirale, si assume che le stelle si formino con maggiore probabilità in ogni data regione quando la densità è piú alta; il periodo di variazione della densità dovrebbe essere determinato dalla rotazione galattica e dovrebbe valere circa 100 milioni di anni.

Secondo un'altra plausibile spiegazione, questo intervallo rappresenta il tempo che occorre al sistema solare per formarsi dopo che una supernova finale innescò l'inizio della sua condensazione. Questa teoria, comunque, si scontra con alcune obiezioni: è noto che tutti gli oggetti nel sistema solare si sono solidificati alla distanza di pochi milioni di anni gli uni dagli altri. Perché avrebbero dovuto solidificarsi cosí improvvisamente, 100 milioni di anni dopo l'evento che ne iniziò la formazione? Si ritiene anche che il tempo necessario a una stella come il Sole per formarsi sia dell'ordine di 10 milioni anziché 100 milioni di anni. La teoria della rotazione galattica appare perciò molto piú soddisfacente.

Combinando i risultati ottenuti dai diversi cronometri si possono ricostruire i probabili tassi di comparsa delle supernovae lungo l'intera durata della nucleosintesi (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*). I migliori valori dei rapporti di abbondanza e di formazione di cui oggi si dispone portano a concludere che il numero delle supernovae fosse al di sopra della media al tempo dell'origine dell'universo e che possa essersi registrato un picco secondario nel tasso di comparsa delle supernovae poco prima della formazione del sistema solare. I margini di errore sono comunque abbastanza ampi perché un tasso uniforme di nucleosintesi spieghi i dati osservati.

Il secondo picco, posteriore, è molto sensibile all'abbondanza di plutonio-244. Sfortunatamente, il valore di questa abbondanza è ancora incerto.

Il picco piú antico risulta dipendente dalla formazione di uranio-233, per quanto concerne i nuclei a vita piú lunga. Se il tasso medio di formazione dell'uranio-235 è basso, allora in una epoca precedente il tasso di comparsa delle supernovae deve aver registrato un forte picco, se i dati relativi all'uranio-235 devono accordarsi con il tasso medio complessivo di nucleosintesi, quale risulta in base ai cronometri a vita piú lunga. Benché l'ampiezza di questo picco non sia in alcun modo determinabile, è probabile che l'iniziale tasso di comparsa delle supernovae fosse maggiore, o al massimo uguale al tasso medio. Un alto tasso iniziale di comparsa delle supernovae suggerisce che la Galassia possa essere stata piú luminosa nel passato. Forse nel nucleo della Galassia stava esplodendo un tale numero di stelle di grande massa che la Galassia stessa era un quasar.

L'età calcolata dell'universo, nel suo complesso, è fornita da nuclei a vita lunghissima. Le incertezze dei dati relativi a questi cronometri indicano che l'età degli elementi deve oscillare tra 7 e 15 miliardi di anni; la miglior stima è di 10 miliardi di anni. Pertanto le nucleocronologie forniscono un'età abbastanza in accordo con quella calcolata sulla base dell'espansione dell'universo e delle popolazioni stellari degli ammassi globulari.

In futuro dovrebbe essere possibile ridurre considerevolmente i margini di errore presenti in questi calcoli. Un progresso significativo in questo senso potrebbe essere acquisito misurando sperimentalmente qual è la sezione di urto di cattura neutronica che permetterebbe una migliore valutazione del rapporto di formazione di renio-187 e osmio-187. Determinazioni piú precise delle abbondanze relative di plutonio-244, torio-232 e uranio-238 potrebbero anche aumentare la precisione, al pari di un miglioramento nei calcoli relativi al processo di formazione *r*.

Inoltre, potrebbero essere sviluppate tecniche di impiego di altri nucleocronometri. Due nuclei promettenti sono il samario-146 (tempo di dimezzamento 100 milioni di anni) e il piombo-205 (tempo di dimezzamento 15 milioni di anni). Questi nuclei non si formano nel processo *r* e pertanto potrebbero metterci in grado di osservare se tutti i processi nucleosintetici danno luogo a cronologie confrontabili.

Un tempo si riteneva che l'alluminio-26, con tempo di dimezzamento di 740 000 anni, potesse essere usato come cronometro. Analisi su meteoriti e campioni di rocce lunari eseguite da me e dai miei collaboratori presso l'Istituto di tecnologia della California, hanno tuttavia mostrato che in questi oggetti non erano presenti quantità significative di alluminio-26. Questo risultato era però da attendersi poiché il tempo di dimezzamento è assai inferiore all'intervallo di 100 milioni di anni, indicato dalla cronologia dello iodio-129 e del plutonio-244.

Queste nucleocronologie, abbinate con l'osservazione dell'abbondanza degli elementi pesanti nelle stelle e con le teorie relative alla formazione delle stelle, sono state utilizzate da numerosi ricercatori nella formulazione di teorie particolareggiate concernenti l'intera storia della Galassia. Ulteriori progressi nella correlazione della nucleocronologia con altre informazioni astronomiche potrebbero fare scaturire importanti risultati nell'immediato futuro.

Desta impressione il fatto che tre tecniche completamente differenti come l'osservazione della velocità di fuga delle galassie, la determinazione delle età degli ammassi globulari e il calcolo delle nucleocronologie possano fornire valori di età in accordo fra di loro per quanto riguarda l'universo. Se noi accettiamo solo quelle età che si accordano con tutti e tre i metodi, l'universo risulta allora avere un'età di 10-15 miliardi di anni. Il riuscire a misurare un dato astronomico, e particolarmente un dato di tale importanza, con un margine di errore del 33 per cento, è quanto mai soddisfacente.

Eclissi totali di Sole

Le possibilità di ricerca offerte da un'eclisse totale di Sole aumentano col perfezionarsi delle tecniche di osservazione e con i nuovi strumenti installati a bordo di aerei e di laboratori orbitanti

di Mario Rigutti

Un'eclisse di Sole ha luogo allorché i centri della Luna e del Sole si trovano, per un osservatore terrestre, a una distanza angolare sufficientemente piccola, e può essere totale (quando il disco lunare copre completamente quello solare), o parziale, o anulare (quando, pur essendo i centri angolarmente molto vicini o sovrapposti, il disco lunare ha un diametro angolare piú piccolo di quello solare). La possibilità del verificarsi dell'eclisse di Sole è dovuta a due motivi: uno legato all'origine del sistema solare e uno dovuto al caso. Per il primo, gli oggetti del sistema si muovono, grosso modo, su uno stesso piano (il piano dell'eclittica) e, per il secondo, dimensioni reali e distanze dalla Terra della Luna e del Sole sono tali che i dischi lunare e solare presentano entrambi un diametro angolare di circa mezzo grado. Se la Luna fosse stata un po' piú lontana o un po' piú piccola, (o il Sole piú vicino o piú grande) non si sarebbero mai verificate eclissi totali di Sole. Difficile dire se ciò sarebbe stato meglio o peggio, o indifferente, per l'umanità, ma è certo che una buona parte di superstizioni e di miti ha radici in questo fenomeno, che piú di un fatto storico è stato in qualche modo condizionato da eclissi di Sole (e quindi, ammettendo che ogni fatto storico influenzi in qualche modo i successivi, che la storia dell'uomo è stata condizionata da questo fenomeno) e che il fenomeno eclisse di Sole è, modernamente, l'occasione per una serie, ancora inesausta, di ricerche sugli strati esterni di una stella, sulla natura e sul comportamento del mezzo interplanetario e sull'interazione della stella col mezzo nel quale è immersa.

Perché un'eclisse totale abbia luogo, occorre prima di tutto che Luna e Sole abbiano la stessa longitudine (coordinata sferica che si conta sull'eclittica) e ciò equivale a dire che la Luna deve trovarsi nella fase di Luna nuova. In secondo luogo occorre che la Luna passi per uno dei nodi della sua orbita poiché il piano dell'orbita lunare non è quello dell'eclittica seppure rispetto a questo non presenti una forte inclinazione. Un'inclinazione di pochi gradi, circa 5, è tuttavia piú che sufficiente perché due oggetti aventi dimensioni angolari di circa mezzo grado che si trovino sullo stesso cerchio di longitudine non si eclissino affatto ed ecco la necessità per i due oggetti di trovarsi contemporaneamente nelle prossimità di uno dei nodi dell'orbita lunare, cioè di uno dei due punti nei quali le due orbite solare (eclittica) e lunare si intersecano. Si può, pertanto, in base a prolungate, anche non molto precise, osservazioni del moto lunare sulla sfera celeste, prevedere il verificarsi di eclissi di Sole. In effetti tali previsioni erano già patrimonio degli antichi caldei. Il ciclo lunare è di 29,5306 giorni (da una fase di Luna nuova, ad esempio, alla successiva di Luna nuova) mentre il tempo che passa tra due passaggi della Luna allo stesso nodo è di 27,2122 giorni. Si vede subito che 223 cicli lunari corrispondono quasi esattamente (con una differenza di poco piú di mezz'ora) a 242 cicli di passaggio al nodo. Quindi dopo un periodo (Saros) di 18 anni, 11 giorni e 8 ore, le condizioni in cui si verificò un'eclisse si devono, grosso modo, ripetere. C'è da osservare, tuttavia, che eclissi intervallate da un Saros sono visibili in regioni diverse della Terra perché un Saros non corrisponde a un numero intero di giorni. C'è un disavanzo di circa 8 ore che corrisponde a una rotazione di circa 120 gradi della Terra intorno al proprio asse e pertanto i luoghi da cui sono visibili due eclissi intervallate da un Saros sono separati di circa 120 gradi in longitudine.

Naturalmente anche eclissi corrispondenti non si svolgono con modalità del tutto uguali. Bisogna tener conto, per esempio, delle distanze relative Terra-Sole e Terra-Luna, che variano continuamente, e della parte della Terra interessata dal cono d'ombra della Luna poiché questa, per un dato cono d'ombra, è diversa all'equatore e ai poli.

In effetti il calcolo di un'eclisse di Sole è notevolmente complesso e si basa sulla conoscenza precisa del moto della Luna il quale presenta molte irregolarità di cui la teoria tiene conto. Detto per inciso (ne riparleremo un po' piú avanti) la teoria sul moto della Luna è, oggi, di fondamentale importanza per la misura del tempo (tempo delle effemeridi) e pertanto il confronto fra gli istanti calcolati per l'eclisse e quelli ricavati dall'osservazione permettono una verifica della teoria del moto lunare.

Naturalmente, finché perdurano le condizioni che si sono dette perdura l'eclisse. In generale poche ore. Ma poiché la Luna e il Sole mutano le loro posizioni rispetto alla Terra e questa, contemporaneamente, ruota intorno al proprio asse, la zona di totalità si sposta sulla superficie terrestre e definisce una fascia di totalità che, tenuto anche conto delle distanze massime e minime della Luna e del Sole dalla Terra, non supera quasi mai i 300 chilometri di larghezza. La lunghezza di questa fascia può essere, invece, assai variabile e dipende da tutti i parametri ricordati fin qui. La velocità con cui l'ombra della Luna corre sulla superficie terrestre è, grosso modo, di 500 metri al secondo. Tenendo conto di tutti questi dati ne viene allora che la durata massima teorica, al livello del mare, di un'eclisse totale di Sole è di poco piú di 7 minuti e mezzo e perché ciò avvenga occorre, fra l'altro, che il nodo lunare (il quale nel tempo si sposta sull'orbita) si trovi al perigeo e il Sole si trovi all'apogeo in modo che i diametri angolari della Luna e del Sole siano, rispettivamente, massimo e minimo. In generale queste condizioni sono lungi dal presentarsi e quindi le eclissi totali hanno durate molto meno lunghe, un paio di minuti e anche meno, fino a pochi secondi o, diciamo cosí, meno di zero secondi quando l'eclisse è anulare anziché totale.

Nella tabella a fianco sono riportate tutte le eclissi totali dall'inizio di questo secolo; di esse è data la larghezza massima della fascia di totalità e la durata massima (che si ha, ovviamente, per una data eclisse, in una zona assai ristretta lungo la fascia di totalità, sulla linea centrale della fascia).

Nella figura a pagina 45 sono riportate le linee centrali delle fasce di totalità delle eclissi comprese tra il 1963 e il 1984 calcolate da Meeus, Grosjean e Vanderleen.

È evidente che la probabilità di poter osservare un'eclisse totale di Sole in un dato posto della Terra è estremamente bassa, praticamente irrilevante. Per esempio, l'Italia centrale, interessata da un'eclisse totale di Sole il 15 febbraio 1961 – un'eclisse per nulla eccezionale, col Sole basso sull'orizzonte (12°43' di altezza, a Firenze), della durata di circa due minuti – dovrà attendere il giorno 6.7.2187 per poter essere nuovamente il luogo d'osservazione di un'altra eclisse totale di Sole. Ma anche la probabilità di poter osservare in un posto generico qualunque della Terra un'eclisse totale di Sole è molto bassa. Il fenomeno è in sé un fenomeno raro. In media avviene tre volte l'anno (ma non meno di due) e spesso si tratta soltanto di eclissi parziali. Se poi si chiede di poter osservare l'eclisse totale con strumentazione adeguata bisogna, in pratica, tener conto del fatto che la superficie terrestre è per gran parte coperta dai mari e che della terra ferma la gran parte è deserta o disabitata. Infine, bisogna tener presente che le osservazioni sono fortemente dipendenti dalle condizioni meteorologiche (e dalle guerre in atto!). Si comprende quindi facilmente perché gli osservatori spesso si trovino a dover lavorare in condizioni ambientali e climatiche assai difficili e soprattutto quanto estremamente bassa sia la probabilità di avere un'eclisse totale utile ai fini delle osservazioni scientifiche: cosí si può dire che il Sole eclissato è stato osservato dalla Terra nel corso di questo secolo, per un tempo non superiore a un'ora e mezza. Forse non è il caso di valutare in lire il costo di quest'ora e mezza di osservazione perché probabilmente, pur essendo molto elevato, ha fruttato conoscenze sul mondo che ci circonda a prezzo comparativamente molto piú basso di altri prezzi pagati per altri tipi di ricerche non altrettanto dense di risultati.

Ricerche in eclisse

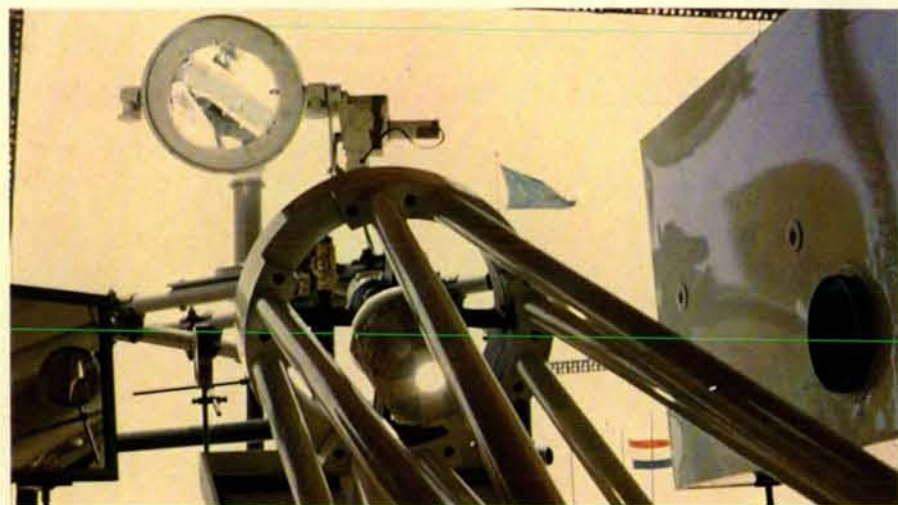
Il fatto che il tempo avuto a disposizione finora per osservare le eclissi di Sole sia stato di un'ora e mezza soltanto dovrebbe essere argomento sufficiente a far comprendere che è necessario continuare a sfruttare queste occasioni. In effetti un'ora e mezza è poca cosa per lo studio di qualunque fenomeno naturale e vi sono molti tipi di problemi o, meglio, campi di ricerca per i quali si può operare durante un'eclisse.

Innanzitutto un'eclisse totale ha interesse per l'astrofisica, poi per l'astronomia in senso lato (meccanica celeste, forma della Luna) e poi per la fisica terrestre, per l'etologia (comportamento degli animali prima, durante e dopo l'eclisse; influenza dell'eclisse, intesa come perturbazione non usuale, sui ritmi circadiani, ecc.) e per l'etnologia (reazioni al fenomeno dei membri di società primitive fornite e non fornite di sistemi di spiegazioni – mitiche, o mitologiche, o religiose – del fenomeno; studio delle reazioni negli stessi tipi di società alla comunicazione che il fenomeno deve accadere, e poi effettivamente accade; studio delle reazioni umane al comportamento degli animali di cui si è detto sopra).

Per l'astrofisico il massimo interesse è ovviamente nella possibilità di osservare gli strati piú esterni del Sole che fuori di eclisse sono invisibili, poiché la radianza del cielo, dovuta alla diffusione della radiazione solare da parte dell'atmosfera terrestre, è tale da mascherare completamente gli strati sola-

DATA	LARGHEZZA DELLA FASCIA DI TOTALITÀ (km)	DURATA MASSIMA min s	DATA	LARGHEZZA DELLA FASCIA DI TOTALITÀ (km)	DURATA MASSIMA min s
28. 5.1900	93	2 10	29. 5.1938	//	4 04
18. 5.1901	238	6 29	12.10.1939	426	1 32
21. 9.1903	251	2 12	1.10.1940	219	5 35
9. 9.1904	234	6 19	21. 9.1941	146	3 22
30. 8.1905	197	3 46	4-5. 2.1943	233	2 39
14. 1.1907	190	2 24	21. 5.1944	146	4 09
3. 1.1908	149	4 14	20. 7.1944	170	3 42
9. 5.1910	//	4 14	9. 7.1945	91	1 16
28-29. 4.1911	192	4 56	20. 5.1947	198	5 14
10.10.1912	87	1 55	1.11.1948	85	1 56
21. 8.1914	181	2 15	12. 9.1950	144	1 13
3. 2.1916	110	2 36	25. 2.1952	142	3 09
8. 6.1918	112	2 23	30. 6.1954	153	2 35
29. 5.1919	244	6 50	20. 6.1955	254	7 08
1.10.1921	303	1 52	8. 6.1956	430	4 44
21. 9.1922	227	5 58	12.10.1958	210	5 11
10. 9.1923	170	3 37	2.10.1959	122	3 01
24. 1.1925	208	2 32	15. 2.1961	263	2 44
14. 1.1926	147	4 11	4-5. 2.1962	147	4 08
29. 6.1927	77	0 50	20. 7.1963	101	5 40
9. 5.1929	195	5 07	30. 5.1965	199	5 16
21.10.1930	86	1 55	12.11.1966	85	1 57
31. 8.1932	166	1 45	22. 9.1968	109	0 40
13-14. 2.1934	126	2 53	7. 3.1970	158	3 28
19. 6.1936	132	2 31	10. 7.1972	178	2 36
8. 6.1937	250	7 04	30. 6.1973	256	7 04

I dati riportati si riferiscono alle eclissi totali di Sole avvenute dal 1900 al 1973 (da: J. Meeus, C. C. Grosjean e W. Vanderleen, *Canon of solar eclipses*, Pergamon, 1966).

Fotografia della corona solare ripresa durante l'eclisse totale di Sole del 30 giugno 1973, nella base di Atar in Mauritania, dal gruppo italiano dell'Osservatorio di Capodimonte.

Particolare della strumentazione di cui era dotata la spedizione italiana ad Atar. In alto, il secondo specchio del celostata; in primo piano il telescopio (tipo Gregory) di cinque metri di focale; a destra la faccia di entrata dello spettrografo a tre percorsi ottici.

ri che si trovano al di sopra della fotosfera. Ma allorché si ha un'eclisse totale la radiazione fotosferica non arriva piú direttamente sull'atmosfera terrestre e la radianza di questa cade a valori molto bassi sicché cromosfera, protuberanze e corona divengono direttamente visibili e comodamente osservabili anche con strumentazione ottica tradizionale.

In realtà, l'osservazione della corona si può fare anche in assenza di eclisse totale, in alta montagna, col cosiddetto coronografo, ma anche in queste condizioni sfuggono all'osservazione la parte piú vicina al bordo solare, a causa della radiazione fotosferica parassita che rimane a livelli troppo elevati, e la parte a distanze superiori a un raggio solare, poiché la radianza della corona è di nuovo piú bassa di quella del cielo; infine, il tipo di osservazioni che si possono fare sulla parte intermedia è disturbato dalla luminosità residua del cielo sia per quanto riguarda l'osservazione di righe spettrali deboli sia per quanto riguarda le strutture fini.

La fisica degli strati esterni del Sole presenta un numero assai elevato di problemi. Per esempio, lo studio fisico della fotosfera si può fare abbastanza bene supponendo l'equilibrio termodinamico locale e l'equilibrio idrostatico. Ma queste condizioni non si possono supporre verificate, nemmeno in prima approssimazione, sopra la fotosfera, nella cromosfera e nella corona. Le condizioni fisiche cambiano bruscamente dalla fotosfera alla cromosfera e da questa alla corona e quindi ha estrema importanza lo studio delle zone di transizione poiché è certamente in queste la chiave per la comprensione dei fenomeni che si osservano. È evidente che non possiamo descrivere qui i problemi della fisica della cromosfera e della corona ma, per fare un esempio, si può capire che non è del tutto banale trovare, quantitativamente, un meccanismo che permetta di spiegare perché la corona solare si estende fino alla Terra e attraverso quali processi la sorgente, ossia la fotosfera, che si trova a una temperatura di 6000° K, possa riscaldare la corona fino a portarla a una temperatura di vari milioni di gradi. La corona, d'altra parte, è un plasma estremamente rarefatto composto, come numero di particelle, essenzialmente di elettroni (e secondariamente di protoni e atomi fortemente ionizzati), a temperatura molto elevata e influenzato in maniera vistosa dai campi magnetici e dal campo di radiazione solare. È, in altre parole, un laboratorio nel quale vengono svolte naturalmente « esperienze » che nei nostri laboratori terrestri non si possono eseguire. L'osservazione di quel le « esperienze » e la successiva interpretazione possono dunque fornire una verifica di teorie già esistenti e una nuova occasione di approfondimento (si veda l'articolo *La corona solare* di Jay M. Pasachoff, in « Le Scienze », n. 65, gennaio 1974).

Allo stesso modo, in eclisse, può essere affrontato molto meglio che con coronografi, il problema posto dalle protuberanze solari, nuvole o getti di plasma di tipo cromosferico immersi per gran parte nella corona e soggetti alle influenze dei campi magnetici locali e dei campi di radiazione fotosferico, cromosferico e coronale.

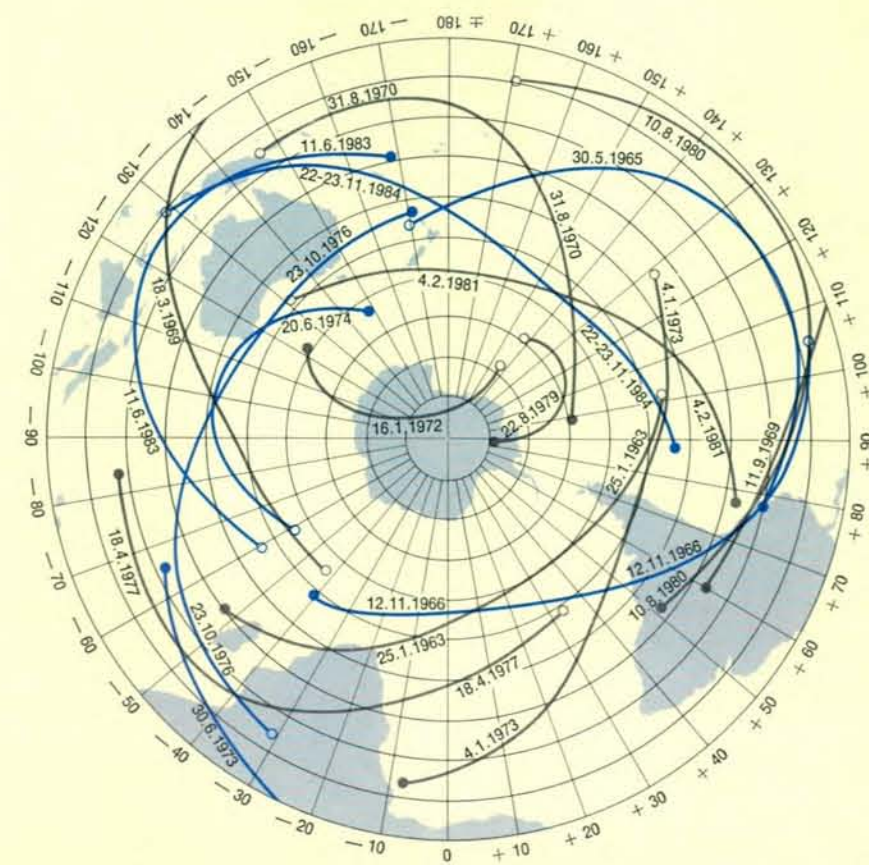
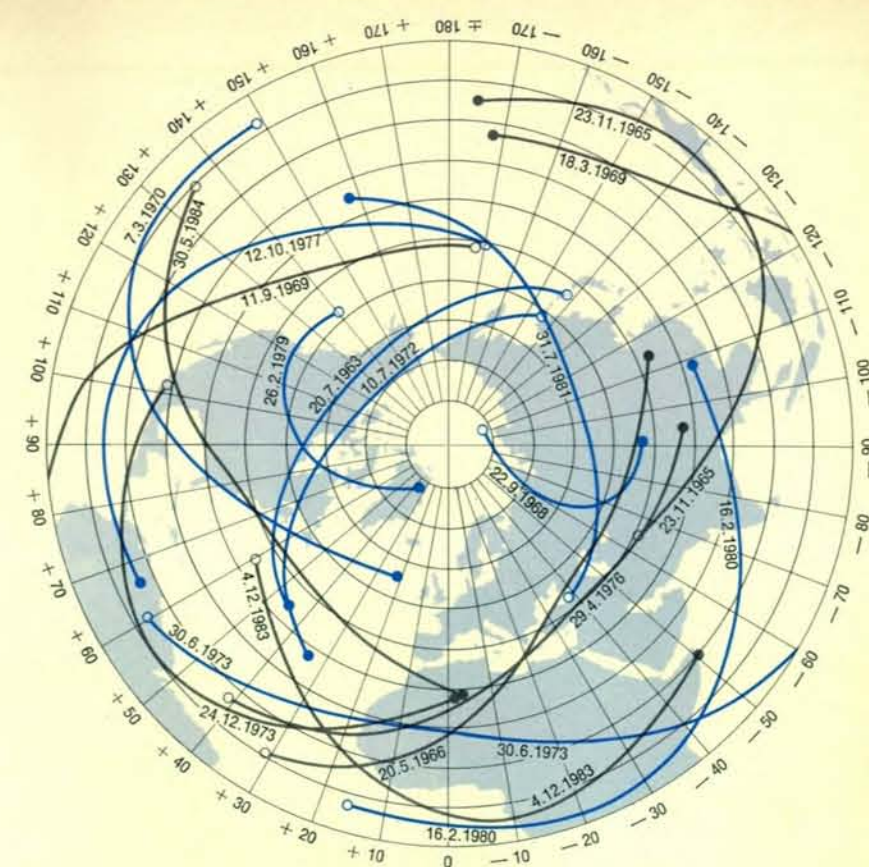
Passando ad altri tipi di ricerche, un'eclisse (in questo caso, anche parziale) permette l'effettuazione di misure, simultanee e con la stessa strumentazione, di posizioni relative del Sole e della Luna con lo scopo di migliorare la teoria del moto lunare. Sono ben note le difficoltà di definizione dell'unità di tempo derivanti dal fatto che la Terra non si muove né come un rotatore rigido né con legge nota in termini del tempo della meccanica. Il moto del Sole intorno alla Terra (o della Terra intorno al Sole – è chiara l'equivalenza) è invece tale da poter essere descritto con molta precisione in funzione delle leggi della dinamica e per questo motivo è stato definito il tempo delle effemeridi il quale non è altro che l'argomento delle tabelle del moto del Sole. Una misura di tempo si traduce quindi in una misura di posizione del Sole in cielo. Ma per ragioni pratiche, una misura di posizione della Luna risulta assai piú precisa di quella del Sole e da qui discende la necessità pratica di conoscere con estrema precisione la teoria del moto lunare (soggetto a varie « irregolarità ») in modo da poter trasformare le misure di tempo fatte con la Luna in misure di tempo delle effemeridi cioè di tempo della meccanica.

Ancora nel campo dell'astronomia di posizione, durante l'eclisse si può studiare la forma della Luna (che si proietta sul Sole) e, infine, non si possono dimenticare le misure di posizione delle stelle che, eventualmente, si rendono visibili, durante l'eclisse, nelle vicinanze del Sole per verificare la previsione relativistica sulla deviazione della traiettoria di un fascio luminoso ad opera di una massa materiale.

Per quanto riguarda la fisica terrestre la gran parte delle osservazioni riguarda la fisica dell'atmosfera. Durante l'eclisse viene repentinamente a decrescere il flusso di radiazione di alta frequenza che è quella che determina la struttura dell'alta atmosfera che, a sua volta, determina molti fenomeni terrestri. Effetti sulla propagazione delle onde elettromagnetiche, effetti geomagnetici dovuti alla ridistribuzione delle correnti elettriche ionosferiche, effetti sull'eccitazione delle molecole dell'atmosfera e sul numero totale di elettroni ionosferici sono quindi previsti e vengono osservati durante le eclissi totali.

L'eclisse totale di Sole del 30 giugno 1973

Data l'eccezionale durata dell'eclisse che ha avuto luogo il 30 giugno 1973 (massima durata 7min 04s, nel Niger) e dato l'interesse che questa eclisse ha destato ovunque, vale forse la pena di dare, in particolare, alcune notizie su come si sono svolte le cose.

Già per l'eclisse totale di Sole del 7 marzo 1970 (massima durata 3min 28s) che vide gli osservatori concentrarsi nel Messico fu fatto un certo sforzo di organizzazione internazionale e il buon successo di allora fu sicuramente uno stimolo a ritentare, anche con maggiore impegno, un coordinamento su scala internazionale delle attività organiz-

Linee centrali delle eclissi solari dal 20 luglio 1963 al 30 maggio 1984 (*in alto*) e dal 25 gennaio 1963 al 22 novembre 1984 (*in basso*). Le linee in colore si riferiscono alle eclissi solari totali; quelle in grigio alle eclissi solari parziali. I cerchietti e i pallini situati alle estremità delle linee indicano rispettivamente l'inizio e la fine dell'eclisse.

zative che fino ad allora ogni gruppo di osservatori aveva svolto indipendentemente dagli altri. Il fatto che l'eclisse del 30 giugno si svolgesse in pratica, tutta sul suolo africano e, su questo, in gran parte, in regioni povere e desertiche, era una ragione di piú per scegliere la strada dell'organizzazione internazionale (sempre tutt'altro che facile). Era, infatti, quasi impossibile che ogni gruppo di professionisti, o di amatori, o di turisti, potesse risolvere da sé i propri problemi poiché per il paese ospitante, quando questo non ha risorse, anche un migliaio di persone (ma in Mauritania affluirono ben piú di un migliaio di persone) può costituire un problema e certamente non ci si improvvisa, senza l'aiuto delle autorità locali, abitatori, sia pure occasionali, del deserto, e specialmente nei mesi piú caldi.

Cosí, già durante l'Assemblea generale del 1970 dell'Unione astronomica internazionale (UAI) furono prese alcune decisioni riguardanti il coordinamento e la distribuzione delle informazioni e, in seguito, furono organizzate tre riunioni a livello internazionale (a Seattle, USA, nel 1971; a Madrid, Spagna, e ad Atene, Grecia, nel 1972) per discutere e cercare di risolvere gli innumerevoli problemi collegati con l'osservazione dell'eclisse. Al simposio di Madrid intervennero anche autorità dei paesi africani interessati dal fenomeno per mettere a disposizione della comunità astronomica internazionale molta buona volontà di cooperazione, per quanto riguardava l'organizzazione, suggerimenti e aiuti concreti specie l'approvvigionamento dell'acqua e del cibo, e il reperimento di posti letto. Fu poi organizzato dall'UAI un viaggio di una delegazione ufficiale in Africa composta da R. R. La Count della National Science Foundation, coordinatore per le attività statunitensi relative all'eclisse del 1973, e dallo scrivente nella sua qualità di *chairman* del Gruppo di lavoro sulle eclissi di Sole della stessa UAI. Tale missione serví a stabilire contatti diretti con molte autorità politiche e amministrative, a discutere e programmare variazioni temporanee delle rotte aeree sorvolanti le zone scelte per le osservazioni, a discutere e prendere accordi generali relativamente alle pratiche doganali, a scegliere alcuni posti di osservazione « ufficiali » per i quali le autorità locali si sarebbero particolarmente impegnate circa la fornitura di acqua, viveri, mezzi di trasporto, generatori di energia elettrica e posti letto. Oltre a tutto questo lavoro organizzativo, varie spedizioni di diversi paesi si sono recate nel corso del 1971, del 1972, e nei primi mesi del 1973 a ispezionare molti dei possibili luoghi di osservazione e vari studi climatologici sono stati eseguiti per determinare le diverse probabilità di tempo buono nei diversi posti lungo la fascia di totalità. Tutte queste informazioni, quelle di carattere organizzativo di cui si è detto prima, le schede coi programmi scientifici dei vari gruppi e coi dati astronomici relativi alle modalità dell'eclisse, sono state distribuite su scala mondiale attraverso un « bollettino », edito dalla National Science Foundation (USA), a cura di R. R. La Count, di cui sono apparsi 4 volumi per un totale di 635 pagine mentre un quinto volume, di prossima pubblicazione, conterrà i risultati e i rapporti scientifici preliminari; questi dati costituiranno una specie di bilancio generale del lavoro compiuto.

La figura della pagina a fronte mostra la estensione della fascia di totalità dell'eclisse del 30 giugno 1973 e la parte della Terra dalla quale il fenomeno è stato visto come eclisse parziale.

La tabella di questa pagina dà la durata della totalità sulla linea centrale e la larghezza della fascia di totalità per vari punti. L'inizio è nel Surinam, Sud America, col Sole al sorgere; poi l'ombra della Luna attraversa l'Atlantico, entra in Africa per attraversare: la Mauritania, il Malí, il Niger, il Chad, il Sudan, il Kenya, la Somalia e finisce la sua corsa, col Sole al tramonto, nell'oceano Indiano a circa 2000 chilometri a est del Madagascar.

Osservazioni di tipo radio e ottico sono state fatte nel Surinam malgrado la piccola altezza del Sole sull'orizzonte e osservazioni visuali e fotografiche sono state fatte da bordo di un aereo *Cessna* da un'altezza di circa 3800 metri. Parecchie navi, almeno sette, di cinque nazioni, sono state usate per osservare il fenomeno e altri a esso legati. La piú grande, la *Canberra* di 45 000 tonnellate, era partita da New York il 22 giugno, con 1900 passeggeri, e durante l'eclisse si trovava a circa 300 miglia dalla costa mauritana. Delle altre navi, la *Cunard Adventurer* era in mezzo all'Atlantico con 600 passeggeri e le rimanenti erano tra le isole del Capo Verde e la costa della Mauritania. La maggior parte delle 3500 persone che sfruttarono la nave come punto di osservazione erano turisti o amatori ma, per esempio, a bordo della *Texas Clipper* furono fatte alcune esperienze relative al comportamento degli organismi marini piú piccoli in seguito alla diminuzione repentina di illuminazione durante l'eclisse e dalla nave di ricerca sovietica *Professor Viese* furono lanciati alcuni razzi meteorologici.

Degli osservatori sulla terraferma, la gran parte si trovava in Mauritania distribuita essenzialmente in tre posti: Akjoujt, dove erano concentrati turisti e amatori, Atar e Chinguetti dove erano concentrati i gruppi di astronomi professionisti. Ad Atar erano gruppi provenienti da otto nazioni: Francia, Giappone, Italia (spedizione dell'Osservatorio astronomico di Capodimonte, Napoli), Olanda, Repubblica Federale Tedesca, Stati Uniti d'America, Svizzera, Unione Sovietica, con un totale di circa 130 fra astronomi e tecnici, mentre a Chinguetti vi era una spedizione statunitense. Altri osservatori erano nel Niger (francesi, inglesi e amatori italiani, tedeschi e svizzeri), e nel Kenya lungo la costa meridionale del lago Rodolfo (giapponesi e statunitensi).

Ancora in Africa, un razzo statunitense fu lanciato da Nouadibou (Port Etienne) per ottenere spettrogrammi della corona, e due aerei volarono lungo la fascia di totalità inseguendo l'ombra della Luna e allungando, quindi, la durata dell'eclisse. Il primo di questi era un jet statunitense *NC-135* che osservò l'eclisse sorvolando il Niger a un'altezza di 13 000 metri con una durata di 12 minuti di totalità; il secondo era il famoso *Concorde 001* che, volando all'altezza di 17 000 metri a una velocità di 2150 chilometri all'ora, prolungò la fase di totalità a 74 minuti. Il *Concorde* portava a bordo cinque gruppi di osservatori (americani, francesi e inglesi) e, partendo dall'aeroporto di Las Palmas, entrò nella fascia di totalità a est di Chinguetti proseguendo lungo la linea centrale fino a Fort Lamy nel Chad.

Questo, assai sinteticamente, il quadro della distribuzione degli osservatori lungo la fascia della totalità. Assai piú difficile dire le difficoltà che i gruppi di osservatori in Mauritania e nel Niger hanno incontrato a causa della natura dei luoghi e dell'assoluta mancanza di qualsiasi punto di appoggio per eventuali necessità tecniche. Le autorità locali hanno fatto veramente quanto è stato loro possibile e ai diversi gruppi che hanno dovuto attraversare il deserto con tonnellate di materiale scientifico e logistico non è mancata l'assistenza come non sono successivamente mancati il rifornimento dell'acqua e dei viveri e la possibilità di ricovero e di cure adeguate per i malati.

Il numero delle ricerche e delle esperienze dei diversi programmi era veramente imponente e i temi di ricerca coprivano praticamente tutta la varietà di ricerche che già abbiamo brevemente descritto. Scorrendo il bollettino dell'eclisse si trovano ben 100 schede di programmi ufficialmente annunciati. In particolare il gruppo italiano dell'Osservatorio di Capodimonte (Napoli) aveva un programma di osservazioni spettrografiche di protuberanze quiescenti e di fotografie della corona interna (*si veda la fotografia a pagina 44 in alto*) in modo da ottenere, oltre a una documentazione relativa alla corona nel suo insieme, informazioni circa la struttura coronale intorno alle protuberanze osservate. Inoltre, per la fase parziale, il programma conteneva osservazioni spettrografiche di eventuali centri attivi presenti sul Sole. La strumentazione principale consisteva di uno spettrografo a tre camere per l'osservazione in regioni spettrali diverse, costruito per l'occasione dell'eclisse e montato e collaudato nei laboratori dello stesso Osservatorio di Capodimonte (*si veda la fotografia a pagina 44 in basso*). La spedizione e le sue due tonnellate e mezza di materiali furono trasportate al campo di Atar da un aereo dell'aeronautica militare italiana messo gentilmente a disposizione dal Ministero della difesa. Senza questo intervento dell'aeronautica, assai difficilmente la spedizione avrebbe potuto aver luogo dato che un trasporto dei materiali per via di terra, lungo le accidentate piste del deserto (spesso roccioso), avrebbe significato quasi sicuramente danni notevolissimi alle delicate apparecchiature del gruppo.

Le condizioni del tempo lungo la fascia di totalità non sono state ovunque molto buone e molte osservazioni sono state parzialmente o interamente disturbate da formazioni nuvolose e, sul

LOCALITÀ	DURATA min	DURATA s	LARGHEZZA DELLA FASCIA DI TOTALITÀ (km)
RIBEIRA GRANDE, ISOLA CAPO VERDE	4	26,8	268
AKJOUJT, MAURITANIA	6	05,5	279
ATAR, MAURITANIA	6	01,3	281
TESSALIT, MALÍ	6	44,4	290
AGADEZ, NIGER	2	36,0	290
AM DAM, CHAD	6	22,1	283
BOR, SUDAN	5	02,7	272
LODWAR, KENYA	5	00,7	265
LAISAMIS, KENYA	4	44,5	263
CHISIMAIO, REPUBBLICA DI SOMALIA	3	52,3	256

Eclisse totale di Sole del 30 giugno 1973: durata e larghezza della fascia di totalità relativa ad alcune località africane (da: J. S. Duncombe, U.S. Naval Obs., Circ. n. 135).

Nella cartina sono rappresentate la fascia di totalità e la zona di parzialità dell'eclisse totale di Sole del 30 giugno 1973. Le linee in colore indicano la semidurata dell'eclisse; le linee in grigio indicano il tempo in cui l'eclisse è a metà del suo svolgimento.

suolo africano, da sabbia sollevata da forti venti. In particolare ad Atar, dove si trovava anche il gruppo italiano, la fase di totalità è stata disturbata piú volte da nuvole e, a causa del vento che aveva sollevato molta sabbia, la visibilità orizzontale a terra era ridotta a qualche centinaio di metri. Vento e nuvole hanno disturbato anche il volo del razzo statunitense e i gruppi che osservavano ad Akjoujt e a Chinguetti. Buone le condizioni del tempo nel Niger e ottime a Lolengalani sul lago Rodolfo dove alcune nubi presenti durante la fase parziale si erano dissolte prima della totalità. Ottimi i voli dell'*NC-135* e quello del *Concorde*, specialmente di quest'ultimo che in una sola volta ha osservato la fase di totalità per un periodo all'incirca uguale a quello corrispondente alla somma dei tempi di totalità avuti a disposizione dall'inizio del secolo!

Naturalmente è troppo presto per parlare di risultati. O i dati sono fotografie piú o meno belle ma scientificamente poco interessanti o sono scientificamente validi anche se non dicono gran che da un punto di vista « estetico », ma allora richiedono molto tempo per la loro elaborazione e il loro inserimento nel quadro delle teorie esistenti o per la formulazione di spiegazioni nuove nel caso di risultati non previsti o non inquadrabili nelle teorie già note.

Nel complesso, l'eclisse del 1973, costata molto sacrificio anche personale ai partecipanti alle spedizioni, non sembra aver dato, malgrado la sua eccezionale durata, la soddisfazione che, invece, aveva dato l'eclisse del 1970 nel Messico.

I gruppi scientifici che hanno potuto lavorare in condizioni ottime sono stati soltanto quelli che si trovavano sul lago Rodolfo e quelli a bordo dei due aerei. Gli altri hanno sofferto piú o meno (ma in genere piuttosto piú che meno) per le avverse condizioni meteorologiche che o per nubi o per vento di sabbia hanno posto ostacoli alla realizzazione di osservazioni di alta qualità.

Il futuro delle osservazioni di eclisse

È sempre una cosa difficile e, in parte, pericolosa fare ipotesi e previsioni sul futuro, ma nel caso delle osservazioni di eclissi di Sole non si tratta forse tanto di far previsioni di come andranno le cose quanto di soffermarsi un momento a riflettere, a trarre giudizi dai fatti accaduti e da quelli che stanno accadendo e a mettere tutto ciò in un quadro che possa anche essere, in un certo senso, una proposta.

È fuor di dubbio che l'osservazione delle eclissi di Sole da terra ha portato contributi fondamentali, e alla conoscenza della costituzione e della fisica del Sole, e a quella dello spazio interplanetario, e a quella dell'interazione del Sole con la materia dello spazio interplanetario. È anche fuor di dubbio che fino a venti anni fa era impensabile il poter osservare un'eclisse totale se non portando, spesso faticosamente, la strumentazione necessaria là dove l'eclisse si verificava e sperando, con minor o maggior fondatezza, a seconda delle previsioni meteorologiche, che gli sforzi compiuti non fossero vanificati da condizioni atmosferiche avverse. Ma già da una dozzina di anni si è cominciato a osservare (soprattutto da parte della NASA) le eclissi da bordo di aerei.

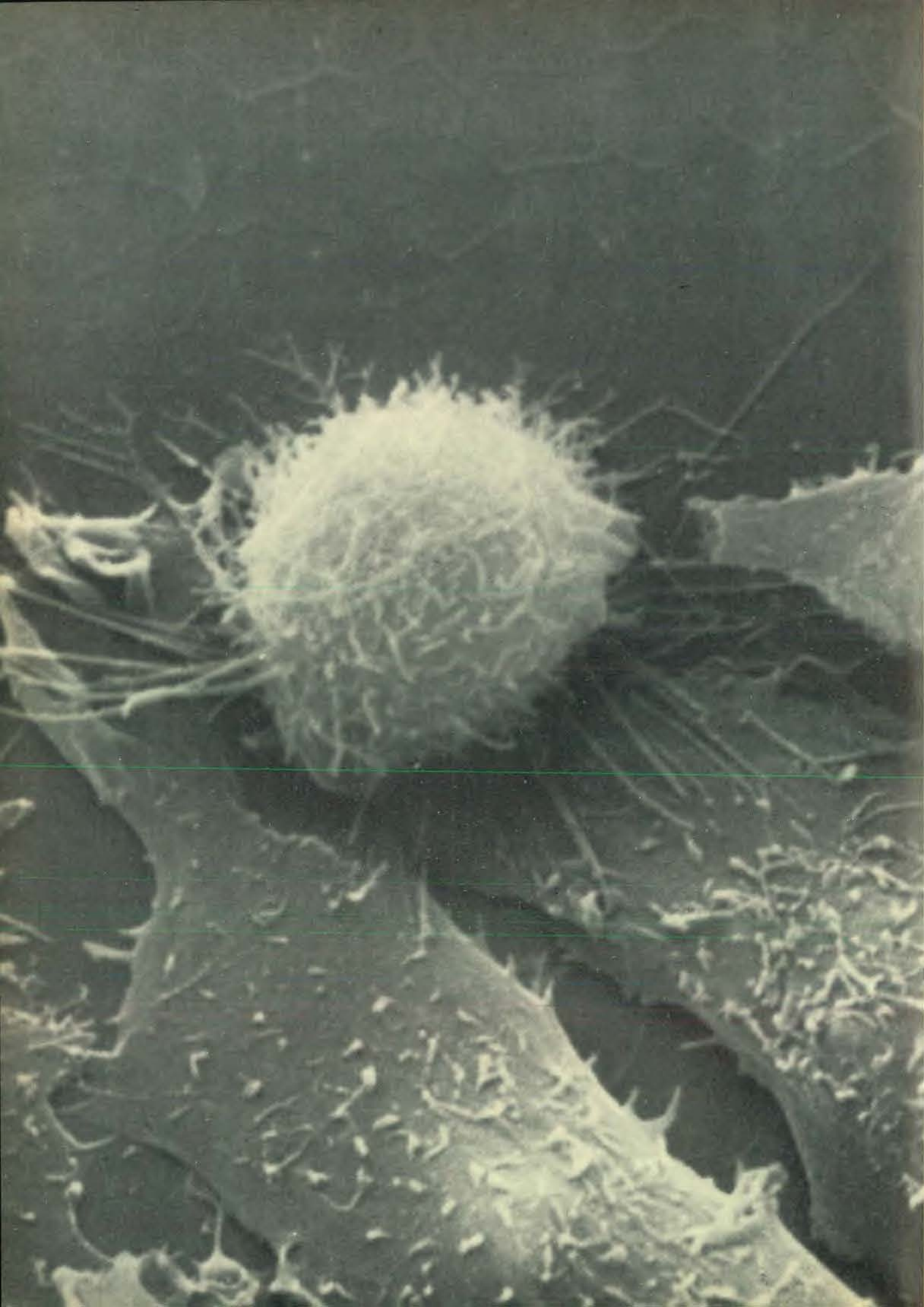
Il ricorso all'aereo limita il tipo di osservazioni a quelle che non abbisognano di un elevato potere risolutivo spaziale (quindi, essenzialmente, a osservazioni coronali), che non soffrono criticamente per eventuali vibrazioni della strumentazione e che non chiedono strumenti ingombranti. Malgrado queste limitazioni, il campo di ricerche possibili è ugualmente vasto. Le osservazioni da terra continuano ad avere senso per tutte quelle esperienze che a bordo di aerei non si possono fare o per quelle che non avrebbe senso fare perché, per esempio, sono molto meno costose a terra, o perché, come certe osservazioni radio, non sono disturbate dall'atmosfera, o perché hanno per oggetto il comportamento della stessa atmosfera.

Tuttavia, ha avuto inizio e si sta sviluppando una convivenza, non sempre facile, fra gruppi che osservano da terra e gruppi che osservano dall'aria. L'ultima eclisse ha visto l'impiego del *Concorde* che, dato il successo ottenuto, ha posto – e l'UAI dovrà esaminarlo con cura – un problema di precedenze. È evidente che col *Concorde* o con l'analogo aereo sovietico *Tupolev 144* si aprono vie all'osservazione nell'infrarosso che prima non vi erano e che la durata di un'eclisse diventa tale da permettere una mole di lavoro impensabile per chi osservi da terra. È anche evidente che un aereo a 17 000 metri di quota non ha, sicuramente, problemi meteorologici e che la bontà delle osservazioni dipende, quindi, soltanto dal corretto funzionamento delle apparecchiature scientifiche e dalla condotta dell'aereo. Dovendo dunque dare la precedenza a qualcuno a chi si dovrà dare? Agli strumenti a bordo di aerei come il *Concorde* o a quelli che potrebbero trovarsi a terra? Giova forse ricordare che di precedenze effettivamente si tratta perché il *Concorde* è un aereo supersonico che produce una onda d'urto il cui effetto si può far sentire fino a circa 25 chilometri di distanza e che i jet, in ogni caso, producono scie di gas che non sono affatto ben viste dagli osservatori a terra.

Attualmente gli aerei hanno dovuto tener conto, a posteriori, dei luoghi da evitare per non interferire con il lavoro degli osservatori a terra, ma è chiaro che il privilegio di questi ultimi è solo frutto di situazioni antiche e che ben presto, se le osservazioni da terra si faranno ancora, il coordinamento internazionale dovrà tener conto di entrambe le possibilità di osservazione.

Ultima in ordine di tempo, ma destinata sicuramente a grandi cose, è l'utilizzazione di veicoli spaziali del tipo *Skylab*. Negli anni '80 dovrebbe funzionare il progetto *shuttle* che prevede un'utilizzazione pressoché continua, da parte di equipaggi specializzati, degli strumenti a bordo della stazione spaziale. La quantità e la qualità dei dati di osservazione saranno tali da superare assai verosimilmente ogni più ottimistica valutazione delle prestazioni degli strumenti a terra. Il dominio dei raggi X e quello dell'infrarosso, assai piú ricchi – specie il primo – di informazioni del dominio visibile, potrebbero portare a sostanziali cambiamenti di vedute e quindi a sostanziali cambiamenti nelle domande poste alla natura. Questo, a sua volta, potrebbe anche significare il tramonto definitivo di certi tipi di ricerca che oggi si fanno e che sono validissimi nell'ambito delle conoscenze attuali.

Esempi di fatti di questo genere se ne sono avuti sempre in abbondanza ed è, d'altronde, ovvio che l'apertura di una nuova finestra sul mondo (sia uno strumento capace di dare informazioni di nuovo tipo, sia la possibilità di osservare fatti nuovi) possa cambiare, anche in modo essenziale, la problematica di fondo.

In questo quadro di sicuro sviluppo delle tecniche di raccolta delle informazioni quale sarà il destino delle osservazioni delle eclissi di Sole da terra (e forse anche dagli aerei)? Personalmente, direi, che l'interesse per quelle osservazioni andrà rapidamente diminuendo perché saranno giudicate troppo costose e troppo aleatorie rispetto alla quantità e alla qualità dei dati che permettono di raccogliere e che, invece, aumenterà, altrettanto rapidamente, l'interesse per le osservazioni da altissima quota o dalle stazioni spaziali, con tecniche nuove e in domini spettrali non accessibili alle osservazioni compiute dal fondo dell'oceano atmosferico.

Il ciclo della cellula

Che cosa accade nella cellula vivente da quando ha origine dalla divisione di una cellula a quando, a sua volta, si divide? Nuovi metodi d'indagine rivelano, in questo ciclo, quattro fasi

di Daniel Mazia

Tranne poche eccezioni, una cellula vivente o si riproduce o muore e questo principio è così ovvio che nessuno si è mai fatto scrupolo di definirlo tale. Una cellula ha origine dalla divisione di una cellula madre e, a sua volta, si moltiplica per due da ogni punto di vista: in ogni sua parte, in ogni tipo di molecola, perfino nel quantitativo di acqua che contiene. Giunta a questo punto, essa si divide con una tale equanime giustizia che ogni cellula figlia è una copia identica della cellula madre. Il raddoppio con conseguente dimezzamento, cioè il ciclo di crescita e di divisione della cellula, è noto generalmente come ciclo cellulare.

Lo studio sistematico del ciclo cellulare, pur essendo noti già da molto tempo gli avvenimenti citati, ha avuto inizio solo in epoca recente. Gli ultimi due decenni hanno assistito a rapidi progressi proprio in questo campo d'indagine. Il volume di più vasta portata sul ciclo della cellula, l'importante testo di J.M. Mitchison, è stato pubblicato soltanto nel 1971, ma in questo venivano citati mille altri studi su tale tema, selezionati da una bibliografia molto più vasta.

L'obiettivo di tutti questi studi è stato generalmente quello di definire il più esattamente possibile gli eventi che si verificano all'interno di una cellula e che caratterizzano una data fase del suo ciclo vitale. Procedendo oltre, si è cercato di scoprire esattamente quali sono gli eventi che si susseguono nella cellula, facendola passare da una fase della sua storia alla fase successiva.

Quando si dice che le cellule raddoppiano tutti i loro costituenti e quindi si dividono a metà, si descrive ovviamente un caso medio. Se si osservano le singole cellule, si trovano deviazioni dalla media: per esempio, durante il periodo di crescita, è stato pesato a vari intervalli di tempo un certo numero di cellule; se il processo fosse consistito in una costante produzione di tutti i costituenti della cellula, inclusi quelli che servono a una ulteriore crescita, si sarebbe dovuta ottenere una serie di dati ponderali ben allineati lungo una curva di crescita dall'andamento regolare. In effetti, tali curve di crescita esponenziali sono state riscontrate in parecchie colture, ma non sempre. In alcuni casi, la velocità di crescita non è costante, ma accelerata; in altri è alta all'inizio e poi diminuisce; in altri ancora aumenta improvvisamente. Naturalmente, dal punto di vista della cellula, queste variazioni potrebbero non avere nessuna importanza, purché la cellula, alla fine del suo periodo di crescita, sia in grado di dividersi regolarmente.

Ma la crescita è proprio un'esatta duplicazione? In caso affermativo, si potrebbe proporre qualche seducente teoria. L'osservazione rivela, tuttavia, che i processi di raddoppio e di dimezzamento sono soltanto approssimativi. Quando Dick Killander e Anders Zetterberg del Royal Caroline Institute di Stoccolma pesarono cellule « sorelle » di tessuto connettivo di topo al momento della divisione, trovarono nei due pesi una differenza media del 10 per cento. David M. Prescott, che stava lavorando allora all'Università di California a Berkeley, e in seguito gli stessi Killander e Zetterberg seguirono la crescita di queste cellule sorelle disuguali scoprendo che né la cellula più piccola raddoppiava esattamente il suo minor volume né quella più grossa il volume maggiore; al contrario, ambedue le cellule tendevano a raggiungere, prima di dividersi, quella che chiamerò una dimensione « adulta » e che, semplicemente, le cellule più piccole impiegavano più tempo a raggiungere lo stesso risultato. Infine, la dimensione adulta non era affatto prefissata. Killander e Zetterberg trovarono nelle dimensioni delle cellule del tessuto connettivo di topo, pronte a dividersi, una variazione di circa il 12 per cento.

Questi risultati hanno dimostrato che una massa di cellule si raddoppia e si divide solo come media e non esattamente, il che ha permesso di giungere a una conclusione che sembra banale ma che, di fatto, ha costituito la base per una più efficace ricerca: evidentemente, le cellule si dividono quando sono pronte a farlo cioè quando hanno completato una certa preparazione per la divisione. Un'altra conclusione a cui si è giunti è che i preparativi per la divisione, di qualunque tipo essi siano, sono mascherati nel processo globale della crescita.

Se una cellula non si divide, non può continuare illimitatamente a crescere: qualche cosa ne limita le dimensioni e arresta il processo di crescita. Una vecchia e non del tutto corretta teoria richiamava l'attenzione sul nucleo cellulare come fattore limitante. Nel 1908, il biologo tedesco Richard von Hertwig propose quella che io poi chiamai la teoria della massa critica.

Una cellula che si sta dividendo (*al centro nella pagina a fronte*) ha modificato la sua configurazione superficiale e da piatta è diventata rotonda, entrando nella fase finale del ciclo: la mitosi. La superficie è ricoperta da molte, lunghe e sottili sporgenze; un certo numero di queste fissa la cellula al substrato. Le cellule qui riprodotte sono ingrandite 8300 volte e provengono dall'ovaia di un criceto. Le cellule piatte, adiacenti a quelle citate, in questa fotografia al microscopio elettronico a scansione hanno superato buona parte della precedente fase del ciclo (G_2). L'immagine è stata ottenuta da Keith R. Porter, David M. Prescott e Jearl F. Frye dell'Università del Colorado.

Fasi del ciclo cellulare, illustrate schematicamente a partire dall'estrema sinistra con la prima e la piú lunga delle tre fasi di crescita: la fase G_1. Nello schema, lo spazio è proporzionale al tempo (*si veda in alto la scala del tempo*). In una tipica cellula di mammifero, la prima fase di crescita dura dalle 6 alle 8 ore, ma può anche prolungarsi. La fase G_1 finisce mentre subentra la seconda fase, S (*a sinistra*), quando la cellula comincia a sintetizzare DNA. Durante le sei ore della fase S il DNA, cioè il materiale genetico dei cromosomi, si duplica (lo schema, per semplicità, mostra la duplicazione di soli due cromosomi). Quando la duplicazione del DNA si è conclusa, la cellula entra nella fase G_2. In cinque ore raggiunge dimensioni doppie rispetto alle originali ed è pronta a iniziare la fase M. In questa fase, che è il periodo di mitosi, i cromosomi si sono condensati in filamenti visibili e il contenuto del nucleo si è rimescolato con il citoplasma le cui molecole (*in colore*) si sono riunite per formare l'apparato mitotico. Infine i cromosomi si distanziano; la cellula madre, essendosi duplicata, è pronta a dividersi a metà mediante una strozzatura in due parti. Le due cellule figlie, identiche, sono in grado di ricominciare nuovamente il ciclo.

Secondo lui, una cellula che si accresce raggiunge alla fine una dimensione alla quale il rapporto tra le masse rappresentate dal citoplasma da una parte e dal nucleo cellulare dall'altra diventa limitante. Quando si raggiunge tale rapporto, secondo Hertwig, si instaura una certa instabilità che mette in moto la divisione cellulare. La sua cosiddetta teoria del rapporto nucleo-citoplasmico non è molto valida quando si considera la massa da sola come fattore scatenante della divisione della cellula. Come si è visto, le singole cellule possono variare sostanzialmente come dimensioni nel momento in cui si dividono; inoltre si riesce a far dividere le cellule prima che esse abbiano raddoppiato la loro massa. Per esempio, con Mitchison ho compiuto una volta questo esperimento: un gruppo di cellule di un certo tipo di lievito, che cresce piú per divisione cellulare che per gemmazione, veniva tenuto «a digiuno» sottraendo l'azoto. Esse non potevano crescere perché la mancanza di questo elemento impediva loro di sintetizzare le proteine necessarie per la crescita. Quello che ancora potevano fare era trasformare alcune delle proteine in loro possesso nei tipi di proteine necessari per la divisione cellulare. Nonostante la dieta, le cellule del lievito continuavano così il loro ciclo e si dividevano in cellule figlie eccezionalmente piccole.

Anche se la teoria della massa critica non è sostenibile, rimane però il fatto che la dimensione di una cellula risulta limitata dalla capacità di un unico nucleo cellulare a portare avanti la crescita. Se si fabbrica in laboratorio una cellula che contenga due nuclei, o due corredi cromosomici in un singolo nucleo, tale cellula può crescere fino a raggiungere una dimensione pari al doppio della normale dimensione adulta. Un esempio di questo comportamento è il modo in cui le cellule dei mammiferi in coltura, danno origine a cellule giganti, quando sono esposte a una dose opportuna di radiazioni ionizzanti. Le cellule irradiate presentano ripetute volte un ciclo normale, ma non sono in grado di dividersi; man mano che aumenta il materiale genetico contenuto nel nucleo cellulare, aumenta la mole della cellula.

Il ritmo del ciclo cellulare

Come ogni studioso di storia, anche colui che esamina la storia del ciclo cellulare trova utile distinguere delle epoche. Inoltre, come ogni altro storico, egli deve poter distinguere tra le pietre miliari costituite da eventi reali (per esempio una rivoluzione o una battaglia decisiva) e i riferimenti che egli stesso si inventa per propria comodità (per esempio l'era del Rinascimento o l'era delle esplorazioni geografiche). Quando divide il ciclo cellulare in due parti – un periodo intermedio di crescita, noto generalmente come interfase, e un secondo periodo in cui ha luogo la divisione – egli riconosce degli eventi reali. La cellula che si accresce è diversa dalla cellula che si divide quasi sotto ogni aspetto.

In termini di tempo reale, il periodo d'interfase è in genere molto piú lungo di quello della divisione. Nella massima parte delle cellule vegetali e animali, l'intero ciclo si compie in un giorno o anche meno. Un ciclo tipico dura all'incirca 20 ore. Di esso solo un'ora o poco piú è occupata dalla divisione della cellula; il tempo rimanente dalla crescita interfasica. Alcune varietà di cellule animali, evolutesi in condizioni sperimentali, possono avere un ciclo di solo 10 ore e alcuni organismi unicellulari come i lieviti e certi protozoi possono avere un ciclo ancora piú rapido (escludo i batteri e altri organismi procariotici, le cui cellule non hanno nuclei; il loro ciclo può allora essere completo in soli 20 minuti). Il protozoo *Tetrahymena*, per esempio, è uno dei favoriti degli studiosi del ciclo cellulare perché l'interfase e la divisione impiegano complessivamente non più di 150-180 minuti.

Per quanto riguarda il ritmo del ciclo cellulare, a date condizioni ottimali di temperatura e di nutrizione, la sua lunghezza per un determinato tipo di cellula è sempre la stessa. Inoltre è difficile alterarlo. Naturalmente, in condizioni sfavorevoli, esso sarà rallentato; ma se volessimo accelerarlo e far crescere piú rapidamente le cellule, non sapremmo proprio come fare.

Tra gli avvenimenti che precedono la divisione cellulare il principale è sicuramente la duplicazione del materiale genetico nei cromosomi. Una cellula non deve necessariamente duplicarsi per sopravvivere. In realtà la duplicazione ha un solo significato: esprime l'intenzione della cellula di diventare due cellule invece di rimanere unica. Questo processo non è sufficiente se non si verifica anche la crescita globale della cellula, cioè la duplicazione di tutti i materiali che mantengono la cellula in vita e che andranno in dotazione alle cellule figlie.

La natura ci spiega alcune delle ragioni per cui il programma del ciclo cellulare richiede un minimo di tempo. Si considerino le uova degli animali, particolari tipi di cellule che si sono accresciute in anticipo e sono piene di quelle molecole che generalmente sono prodotte soltanto dalle cellule in accrescimento. Quando la cellula uovo comincia a dividersi, continua a farlo ripetute volte, dando origine a cellule sempre piú piccole.Il suo ciclo cellulare, che non richiede accrescimento, ma solo preparativi per la divisione e l'atto stesso della divisione, può svolgersi in un'ora o anche meno. Questi brevi intervalli di tempo ci dicono che la fase della riproduzione, nel ciclo cellulare, può avvenire rapidamente, ma che essa è legata alla fase della crescita che necessita di un certo tempo per produrre i materiali grezzi e tutti i meccanismi di cui deve disporre per la riproduzione.

L'analisi odierna delle singole fasi utilizza come principali riferimenti la duplicazione e la divisione dell'acido desossiribonucleico (DNA), il materiale genetico cellulare. Anche se il processo di divisione cellulare era stato ampiamente studiato da piú di mezzo secolo, solo verso il 1950 ci si rese conto che i cromosomi, contenenti il DNA, si duplicano durante l'interfase e si separano durante la divisione. Si può anzi dimostrare che il DNA si duplica solo durante una parte dell'interfase: questa prova si è avuta negli anni '50 con lo sviluppo di raffinate tecniche autodiografiche. Mediante radioisotopi si fornirono alle cellule gli «ingredienti» radioattivi per la sintesi del DNA. In questo modo solo i nuclei delle cellule in cui il DNA si stava duplicando divennero radioattivi, come apparve chiaramente sulle lastre fotografiche eseguite. Seguendo i cicli delle cellule, risultò che esse cominciavano a duplicare il loro DNA a un certo punto dell'interfase e che avevano terminato prima della fine di questo periodo.

Le fasi del ciclo cellulare furono definite per la prima volta nel 1953 da Alma Howard e Stephen Pelc dell'Hammersmith Hospital di Londra. I due autori hanno chiamato fase S il periodo di duplicazione del DNA: questo periodo presenta quei punti di riferimento grazie ai quali le altre fasi possono essere definite. Generalmente passa un po' di tempo tra la «nascita» della cellula e il momento in cui inizia in essa la duplicazione del DNA: questo intervallo è chiamato fase G_1. Al momento in cui la fase S si conclude, la cellula non è generalmente pronta a dividersi e l'intervallo tra la fine di S e l'inizio della divisione cellulare è chiamato fase G_2. La conclusione di G_2 è marcata dall'inizio del periodo di divisione cellulare, noto con vari nomi: M (che sta per mitosi) o D (che sta per divisione).

La durata di G_1, S, G_2 e M varia in diversi tipi di cellule, ma le variazioni tra singole cellule dello stesso tipo sono lievi. A questo riguardo, neppure le variazioni tra diversi tipi di cellule sono enormi. Possiamo persino, con dovuta cautela, parlare di ciclo cellulare tipo. Per esempio, la tabella di marcia di una cellula neoplastica umana in coltura è il seguente: fase G_1, otto ore; fase S, sei ore; fase G_2, quattro ore e mezzo; fase M, un'ora. Ciò non differisce radicalmente dalla tabella di marcia delle cellule dell'apice radicale di *Vicia faba*: G_1, quattro ore; S, nove ore; G_2, tre ore e mezzo; M, 114 minuti. Anche se si notano variazioni tra i cicli cellulari, questi mostrano comunque una certa uniformità: per esempio, può variare la durata di tutte le fasi, ma la variazione di gran lunga piú importante si trova nella fase G_1. Quando un ciclo cellulare è lungo, la maggior parte del prolungamento si nota nella fase G_1; quando un ciclo cellulare è molto corto, come per esempio nelle cellule uovo, la fase G_1 non è misurabile. Per contro, la durata delle fasi S e G_2 può essere notevolmente costante. Per esempio, nella massima parte delle cullule di mammifero, la fase S dura da sei a otto ore e la fase G_2 dura dalle tre alle cinque ore. La fase G_1, invece, può essere solo di poche ore o durare giorni se non addirittura settimane.

Gli eventi dell'interfase

Nella sua variabilità, la fase G_1 cerca di esprimere qualcosa di importante riguardo al ciclo cellulare, ma non si riesce a distinguerne molto chiaramente il messaggio. Nascosti da qualche parte, nell'accrescimento globale della cellula durante la fase G_1, devono esservi processi chiave che permettono alla cellula stessa di passare alla fase S e quindi di impegnarsi in futuro nel-

la divisione. Nel parlare degli eventi della fase S è inadeguato caratterizzarli esclusivamente come sintesi di DNA o duplicazione del DNA. Questo è, certo, il fenomeno misurabile, ma il significato della fase S non è nella pura e semplice duplicazione della quantità del composto chimico DNA, ma piuttosto nell'esatta replicazione dei cromosomi. Si consideri il DNA di una cellula umana all'inizio della fase S: si può considerarlo fatto da 46 filamenti, con una lunghezza complessiva di un paio di metri o piú, ripiegati e ammassati in un nucleo che ha un diametro inferiore a 10 μ. Il processo di duplicazione implica che ognuno dei 46 filamenti formi una copia esatta di se stesso.

Questo processo sarebbe già abbastanza complicato se la duplicazione cominciasse a un'estremità di ogni filamento e proseguisse lungo di esso fino all'altra estremità, ma non avviene cosí. Ogni filamento si duplica invece a segmenti secondo un ben definito programma. In nessun cromosoma i segmenti si duplicano in tandem, né alcun cromosoma completa la sua duplicazione prima che un altro cominci il processo. Dato che il programma di duplicazione è abbastanza costante, si comincia ora a conoscere quali parti di un cromosoma si duplicano per prime e quali per ultime. Sappiamo anche che, quando si duplicano gli ultimi segmenti, la sintesi di DNA si blocca e non può ricominciare fino al prossimo ciclo.

Per passare brevemente alla fase G_2, tutto quello che sappiamo fino a oggi è che comprende le tappe finali dei preparativi che la cellula compie per poi dividersi. Se si arresta la sintesi delle proteine da parte della cellula alla fase G_2, la cellula non si divide. Oltre a ciò sappiamo ben poco su ciò che accade in G_2. Siamo sicuri comunque che la cellula darà inizio alla divisione solo quando essa sarà preparata a farlo.

Se si segue l'incremento quantitativo degli enzimi all'interno della cellula, si riesce a studiare la storia della vita della cellula a livello biochimico. Gli enzimi sono quelle sostanze che definiscono in qualsiasi momento le capacità chimiche della cellula. Proprio come si potrebbe visualizzare la crescita della cellula come un processo in costante accelerazione, cosí si potrebbe concepire la storia biochimica della cellula come la registrazione della costante produzione ex novo di tutti i materiali cellulari. Ma non è proprio cosí: diversi enzimi hanno storie diverse. Mitchison ha trovato che gli enzimi si possono dividere in tre gruppi: alcuni hanno un incremento continuo, cioè con andamento esponenziale, e aumentano in maniera prevedibile quando la cellula cresce; altri hanno un incremento a tappe, in quanto aumentano, e di molto, solo in certi momenti del ciclo cellulare che variano secondo la loro natura; gli ultimi, infine, subiscono un incremento con dei massimi in quanto, in alcuni momenti del ciclo, aumentano e subito dopo diminuiscono, il che fa pensare che svolgano un particolare compito in un determinato momento e siano poi messi da parte, dopo che la loro funzione si è conclusa. Per esempio, gli enzimi implicati nella sintesi del DNA sono evidentemente di quest'ultimo tipo e compaiono soltanto durante la fase S.

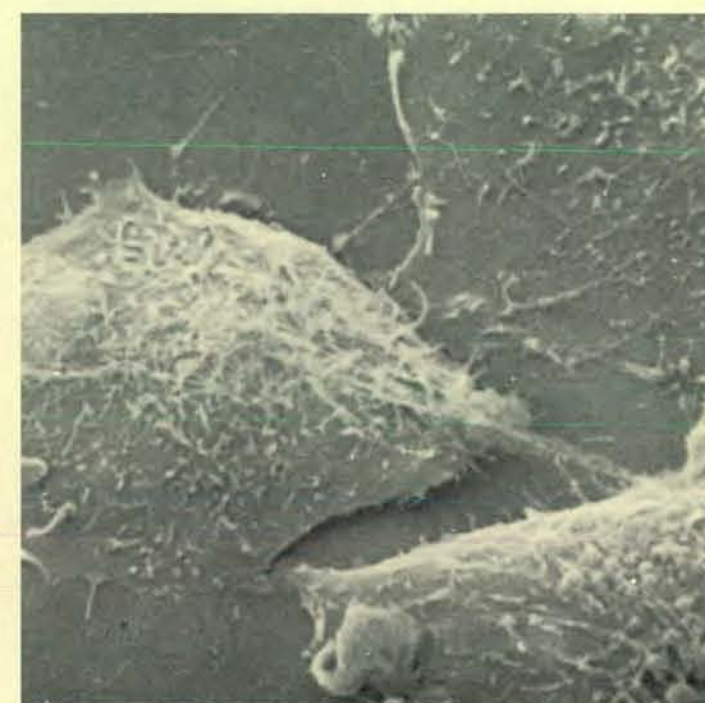
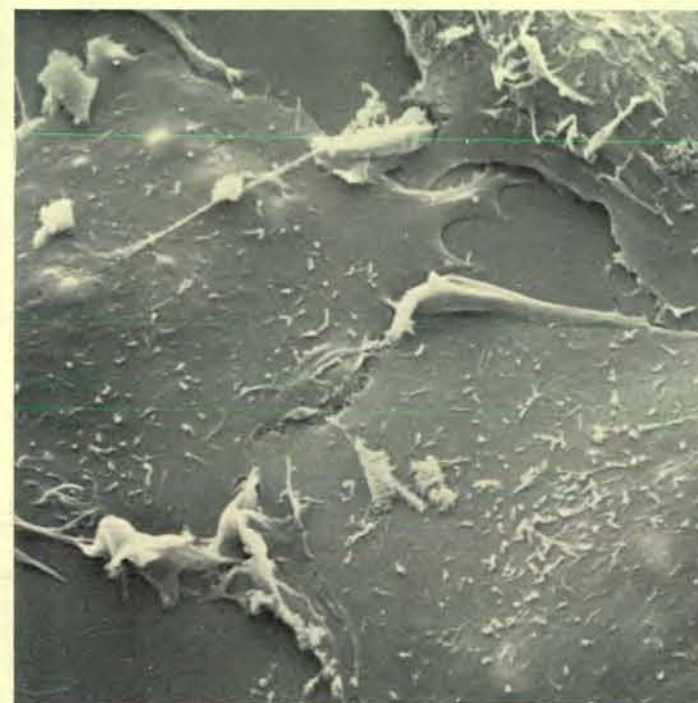
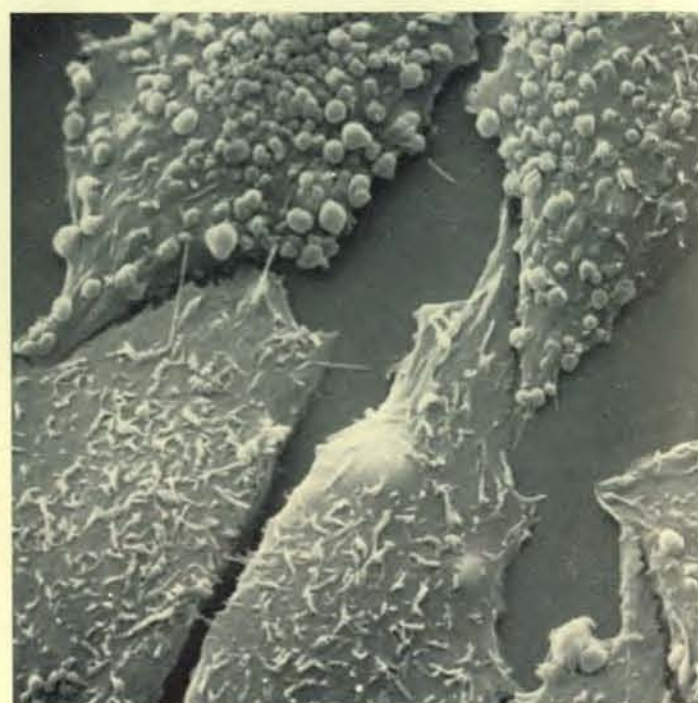
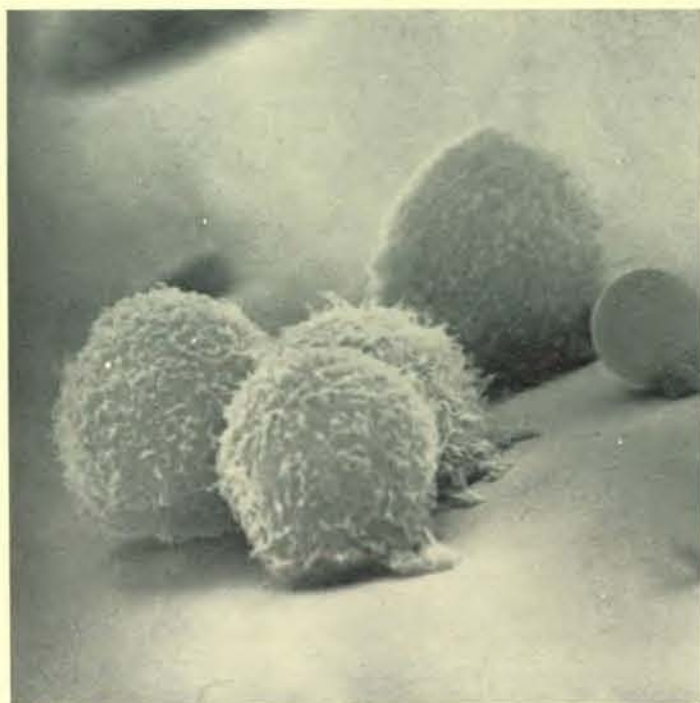
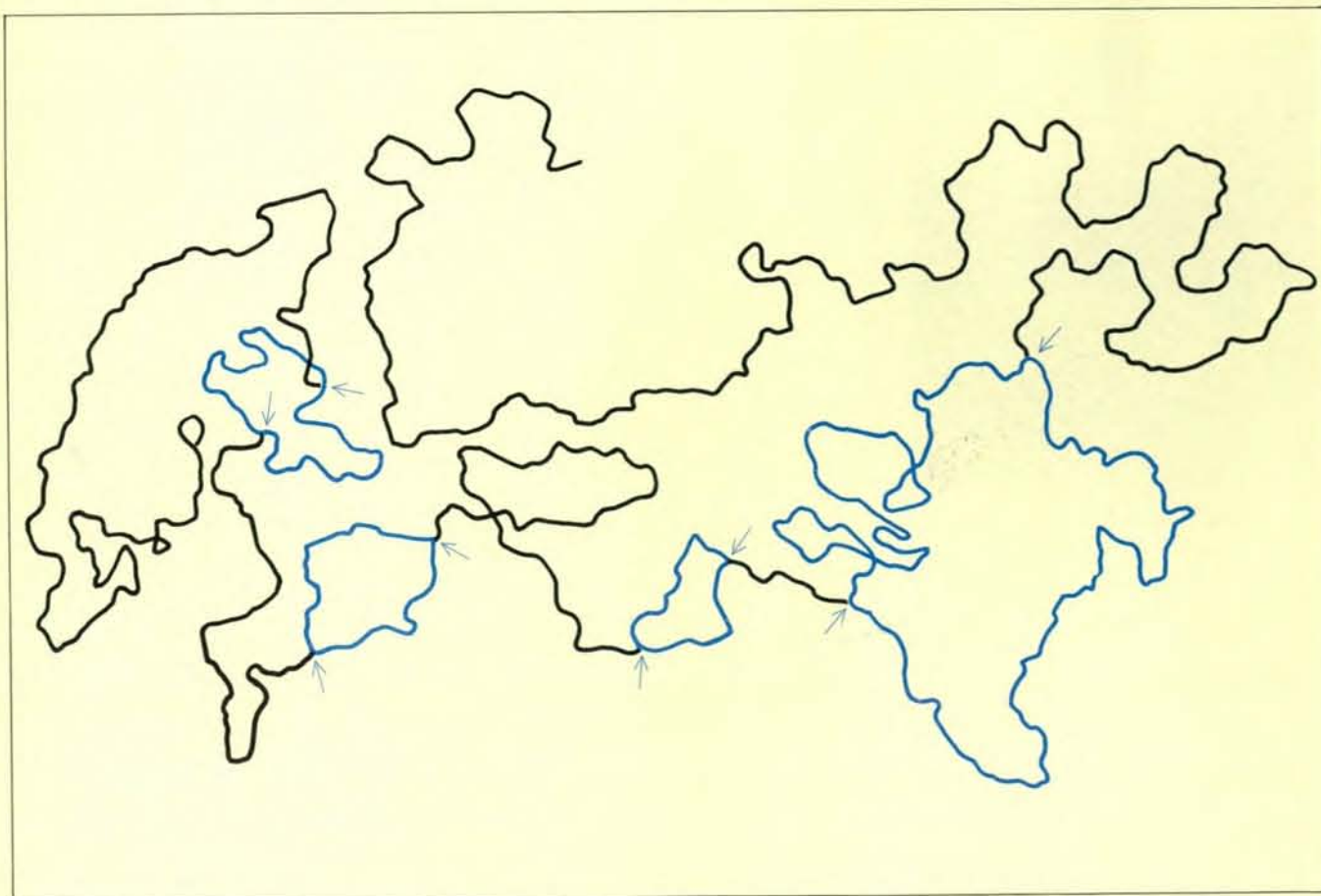
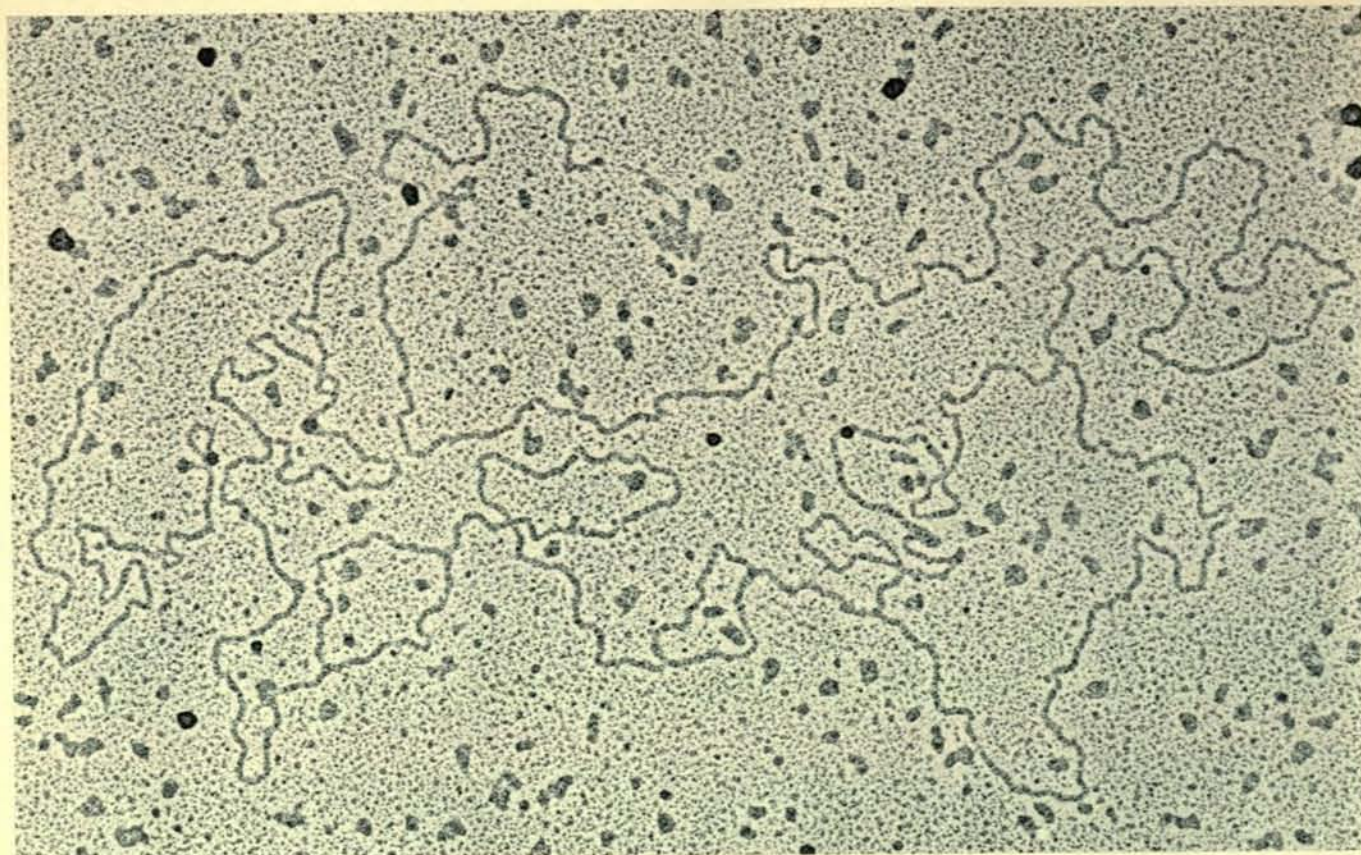
L'esistenza all'interno della cellula di diversi programmi per produrre enzimi nel ciclo cellulare crea nuovi problemi. La stessa idea dell'esistenza di questi programmi richiama la nostra attenzione verso la fonte ultima di riproducibilità negli esseri viventi: i geni. È un dogma della genetica molecolare che la produzione da parte di una cellula di un qualsiasi enzima sia il risultato finale della codificazione del gene che controlla quell'enzima. Facendo un passo avanti, dobbiamo ricordare la costanza degli orari delle fasi del ciclo stesso e chiederci se i geni fanno anche procedere il ciclo cellulare da una fase alla successiva. Parecchi genetisti che utilizzano organismi unicellulari nei loro esperimenti hanno risposto affermativamente a questa domanda, identificando specifici geni che controllano determinati punti del ciclo cellulare. Quando i geni sono resi inattivi in seguito a mutazione, la cellula rimane semplicemente bloccata in qualche punto del ciclo e non può progredire. Leland H. Hartwell dell'Università di Washington ha descritto un certo numero di queste mutazioni geniche nei lieviti: ogni gene mutante, quando era normale, agiva in un punto differente del ciclo cellulare.

I cambiamenti che si verificano nel corso del ciclo cellulare si possono notare anche in superficie. Con il microscopio elettronico a scansione, Keith R. Porter, David Prescott e Jearl F. Frye dell'Università del Colorado hanno ricavato diverse immagini di un tipo di cellula in varie fasi del ciclo: si trattava di cellule provenienti dall'ovaia di criceto cinese coltivate in vitro. Durante la fase M, le cellule sono sferiche e non sono tenacemente attaccate al substrato su cui crescono. Quando iniziano la fase G_1 cominciano ad appiattirsi e la loro superficie mostra bolle e sporgenze digitiformi, note come microvilli. Con il progredire di questa fase, i margini cellulari diventano sottili e attivi e presentano un aspetto increspato. Nella fase S, cambiano di nuovo: si appiattiscono e la loro superficie ritorna liscia. Nella fase G_2 si ispessiscono e di nuovo le loro superfici mostrano microvilli e increspature, mentre le bolle della fase G_1 sono molto meno abbondanti. Cosí, almeno un tipo di cellula di mammifero, sembra riflettere nella sua fisionomia la sequenza di eventi che si susseguono in essa.

Ho caratterizzato il ciclo cellulare come una progressione nel tempo: la cellula cambia radicalmente nel corso del ciclo e siamo in grado di riconoscere fasi distinte lungo il percorso. Naturalmente le fasi potrebbero essere una nostra invenzione; ma è possibile che le fasi che riconosciamo siano reali e distinte l'una dall'altra e che il passaggio da una all'altra richieda un evento ben definito.

Molte prove di cui disponiamo in questo momento sostengono la seconda ipotesi e fanno pensare che il passaggio da una fase del ciclo cellulare alla successiva richieda un evento preciso. Da molto tempo avevamo l'idea che esistessero quelli che io ho chiamato i « punti in cui non si può piú invertire la rotta ». Per esempio, i lavori compiuti nel laboratorio di Erik Zeuthen a Copenaghen hanno dimostrato che la divisione cellulare del protozoo *Tetrahymena* poteva essere inibita innalzando la temperatura dell'ambiente prima di un momento ben preciso del ciclo cellulare; mentre, una volta superato questo punto, l'esposizione a temperature elevate non avrebbe piú impedito la divisione. Evidentemente i protozoi avevano superato un punto in cui la rotta diventava non invertibile e questo punto decisivo veniva sorpassato prima che comparisse un segnale qualsiasi di divisione.

I due meccanismi chiave

Di tutti i passaggi che si verificano nel ciclo cellulare e che noi conosciamo i due piú importanti sono quello dalla fase G_1 alla fase S, quando ha inizio la duplicazione dei cromosomi, e quello dalla fase G_2 alla fase M, quando i cromosomi si condensano e ha inizio la mitosi. Una scoperta nel campo della virologia animale ha fornito un nuovo e potente mezzo per studiare i due passaggi cruciali. Sembra che certi virus, conosciuti come virus Sendai, alterino le membrane cellulari in modo tale che due o piú cellule adiacenti possano fondersi in un'unica cellula. La nuova cellula contiene il citoplasma e i nuclei di tutte le cellule all'interno di un'unica membrana comune. Fatto ancor piú notevole, tipi molto diversi di cellule e perfino cellule di diverse specie animali si possono fondere per azione del virus formando ibridi che non solo hanno pro-

Cambiamenti nella forma e nella struttura della superficie sono caratteristici delle cellule di ovaia di criceto, coltivate in laboratorio. Le cellule figlie (*a sinistra*), all'inizio della fase G_1, hanno già superfici «villose»; questi prolungamenti possono essere residui di filamenti piú lunghi, abbondanti nella fase M (*si veda la fotografia di pagina 50*). Le nuove cellule cominciano a distendersi sul substrato; la sfera liscia piú piccola è un frammento di citoplasma cellulare e non una cellula viva. Le cellule piatte (*a sinistra rispetto al centro*) hanno raggiunto uno stadio tardivo nella fase G_1; le loro superfici sono ricoperte da microvilli e bolle. Parecchie hanno stabilito dei contatti con le cellule adiacenti. Le cellule che si presentano ancora piú appiattite (*a destra rispetto al centro*) sono entrate nella fase S. Le loro superfici non hanno piú bolle e i microvilli sono presenti in numero minore e sono meno sporgenti. In alcune parti dei bordi cellulari sono comparse (*aree chiare*) delle « increspature » verticali. Successivamente (*a destra*), le cellule si trovano nella fase G_2. Sono ancora presenti le increspature; i microvilli sono piú sporgenti e una cellula (*in primo piano*) mostra una fila di bolle. Il significato dei cambiamenti della superficie non è ancora del tutto chiaro, ma la loro coincidenza con le quattro fasi del ciclo cellulare fa pensare che la membrana cellulare sia attiva nel ciclo stesso. Anche queste micrografie, come quella riprodotta a pagina 50, sono di Keith R. Porter e collaboratori.

La duplicazione cromosomica, l'evento chiave della fase S del ciclo cellulare, appare nella micrografia in alto, durante il suo svolgimento in un uovo di drosofila. Il filamento apparentemente ingarbugliato che si nota nell'immagine è il DNA dei cromosomi che si stanno duplicando. La mappa del filamento (*sotto*) localizza le quattro aree in cui i segmenti hanno iniziato il processo di duplicazione (*in colore*); le frecce indicano il punto di biforcazione. Micrografia e schema sono di D. Wolstenholme.

cessi normali ma che possono anche riprodursi.

Se si fondono cellule che si trovano in fasi diverse del ciclo, si possono ottenere risposte dirette alla domanda se esistono effettivamente meccanismi che fanno passare una cellula da una fase del ciclo alla successiva. Potu N. Rao e Robert T. Johnson, lavorando insieme al Medical Center dell'Università del Colorado a Denver, hanno fuso cellule nella fase S con cellule nella fase G_1 e hanno trovato che i nuclei di queste ultime cominciavano a sintetizzare DNA con un forte anticipo rispetto al normale.

Questo risultato ha dimostrato chiaramente che una cellula nella fase S contiene qualche cosa che innesca la sintesi del DNA, mentre questo qualche cosa è assente nella cellula che non ha ancora completato la fase G_1. Ma avrebbe potuto facilmente essere predetto il risultato esattamente opposto. Per esempio, è logico supporre che una cellula rimanga nella fase G_1 perché contiene qualche cosa che impedisce lo svolgersi della sintesi del DNA. Un simile ipotetico inibitore, se messo a contatto con i nuclei di cellule che si trovano nella fase S, arresterebbe presumibilmente ogni ulteriore sintesi di DNA da parte di quei nuclei.

Un approfondimento nella conoscenza del problema dei meccanismi che controllano le fasi del ciclo cellulare si ricava da esperimenti effettuati con ibridi ottenuti per fusione di tipi di cellule i cui cicli cellulari hanno durata diversa. Per esempio, Jennifer Graves dell'Università di California a Berkeley ha coltivato ibridi di cellule di topo e di criceto. In genere le cellule di criceto hanno una fase G_1 più breve di quella delle cellule di topo, per cui se ogni nucleo cellulare negli ibridi avesse seguito la sua normale tabella di marcia, il nucleo del criceto avrebbe cominciato la sintesi del DNA un po' prima del nucleo del topo. In realtà, invece, ambedue i nuclei hanno cominciato la sintesi contemporaneamente. Inoltre lo spostamento della fase S è avvenuto dopo il breve intervallo della fase G_1 delle cellule di criceto. Evidentemente qualunque fosse il fattore che innescava la sintesi di DNA nei nuclei di criceto, esso agiva anche sui nuclei di topo.

In un successivo esperimento la Graves seguí la fase S fino alla fine. Una volta che i nuclei avevano iniziato tale fase, il nucleo di ogni specie seguiva la propria caratteristica tabella di marcia durante la duplicazione. Quelle porzioni dei cromosomi che si duplicavano per prime nella cellula madre continuavano a farlo anche nell'ibrido e quelle che normalmente si duplicavano per ultime nella cellula madre erano le ultime anche nell'ibrido. Evidentemente il segnale per l'inizio della fase S non ha alcun controllo su quello che accade una volta che tale fase è avviata. Al contrario, il programma di duplicazione, caratteristico di ogni specie, deve essere contenuto in qualche modo nel nucleo delle cellule della specie.

Questi esperimenti con cellule fuse forniscono qualche informazione sul ruolo svolto dai meccanismi chiave nel ciclo cellulare. Sappiamo che esiste qualche fattore responsabile dell'inizio della duplicazione dei cromosomi. Questo può costringere ogni nucleo, pronto o no, a iniziare la fase S. Se scoprissimo che si tratta di qualche particolare molecola, la sua identificazione rappresenterebbe davvero un'importante scoperta. È anche possibile però che tale fattore non sia una molecola speciale, ma qualche cambiamento nell'ambiente interno della cellula. Questo ambiente è ricco d'acqua e le sue variabili sono la concentrazione degli ioni, di piccole molecole, l'acidità e l'alcalinità. Ammettendo che gli ingredienti e gli enzimi necessari per la duplicazione del cromosoma siano tutti presenti, allora una modificazione a carico dei semplici fattori citati potrebbe essere responsabile dell'inizio del processo. Sappiamo per certo che la massima parte delle reazioni e delle funzioni che si svolgono nelle cellule sono estremamente sensibili a tali variabili, ma non sappiamo molto su come agiscano o su come la cellula le modifichi.

Un esempio di un simile stimolo di natura ambientale si può trarre dal mio recente lavoro sulle uova di riccio di mare. Le uova vengono rifornite di tutti gli ingredienti ed enzimi necessari per la duplicazione, che normalmente non ha luogo nell'uovo non fecondato. Ho trovato che era possibile avviare il processo anche in queste uova, semplicemente aggiungendo un poco di ammoniaca all'acqua di mare in cui le uova erano immerse. L'ammoniaca penetra facilmente attraverso la membrana e ha l'effetto di rendere piú alcalino l'ambiente interno della cellula.

Secondo la mia interpretazione di questo risultato, il cambiamento nell'ambiente interno della cellula (che è, peraltro, pronta a dar inizio alla duplicazione cromosomica) innesca il processo di duplicazione. L'uovo trattato con ammoniaca rimane comunque vergine e può persino essere fecondato in seguito, dimostrando cosí che il trattamento a cui è stato sottoposto non può essere considerato sostitutivo della fecondazione. Al contrario il trattamento con ammoniaca è da considerare una specie di *by-pass*, che imita qualcosa che, normalmente, avviene solo dopo la fecondazione. Molti altri esperimenti mostrano che il ciclo cellulare è sensibile a semplici fattori presenti nell'ambiente esterno della cellula, per esempio ioni idrogeno, potassio e calcio. L'apprendere in che modo i fattori dell'ambiente esterno agiscano attraverso la membrana per influenzare l'ambiente interno della cellula è di capitale importanza per la comprensione dei controlli che intervengono nel ciclo cellulare.

La fusione di cellule, indotta dai virus, è stata anche utilizzata per studiare l'altro evento chiave del ciclo cellulare: l'inizio della fase M. È questo il periodo di divisione della cellula, caratterizzato dalla condensazione dei cromosomi, in cui questi ultimi si ammassano in filamenti visibili al microscopio. A Denver, Johnson e Rao hanno indotto cellule nella fase M a fondersi con cellule in altre fasi del ciclo. Se una cellula in fase M si fonde con una cellula in fase G_2 il nucleo di G_2 dà luogo a cromosomi condensati di aspetto normale. I cromosomi sono doppi come era da prevedere, essendosi duplicati nella precedente fase S. Quando, invece, una cellula in fase M si fonde con una cellula in fase G_1, costringendo cosí i cromosomi del nucleo G_1 a condensarsi prima della duplicazione, i cromosomi appaiono singoli e non doppi.

La terza combinazione possibile, cioè la fusione di una cellula in fase M con una cellula in fase S, produce un risultato cosí sensazionale che non è ancora stato accettato da tutti. I cromosomi del nucleo in fase S si condensano, ma lo fanno a piccoli frammenti. Questo effetto viene chiamato « polverizzazione » (*si veda la figura a pagina 59*). Evidentemente, nella fase M vi è un fattore che spinge i cromosomi a condensarsi anche quando essi, ovviamente, non sono pronti a farlo. Qualunque sia la sua natura questo agisce su ogni tipo di cellula. Sono stati prodotti ibridi che riuniscono in sé cellule di animali solo molto lontanamente affini, per esempio cellule di uomo e di rospo, e i risultati degli esperimenti sono gli stessi. Se una cellula contiene cromosomi condensati, può costringere i cromosomi dell'altra cellula a una condensazione prematura.

Il ciclo negli organismi

Il controllo di un organismo qual è, per esempio, un animale superiore (cioè una società di cellule), impone che di queste alcune si riproducano e altre no. In generale le cellule di tessuti che svolgono mansioni speciali per l'intero organismo, come le cellule del sistema nervoso e del sistema muscolare, non si riproducono affatto. In altri tessuti, come la cute, il sistema emopoietico e i rivestimenti epiteliali, la velocità di produzione di nuove cellule è modulata per compensare bene la continua perdita di cellule vecchie. In altri casi ancora, in particolare nelle reazioni immunitarie e nei processi di cicatrizzazione di ferite, la moltiplicazione cellulare viene innescata come risposta a una provocazione esterna. Solo in casi di tumori maligni, le cellule corporee si sottraggono al controllo dell'organismo e attuano i loro cicli in maniera anarchica. Non vi è nulla di speciale nel ciclo di queste cellule rispetto ad altre che si riproducono: il ritmo e le fasi del ciclo sono gli stessi. Soltanto che tale ciclo viene ripetuto senza limitazione alcuna da parte delle singole cellule tumorali provocando la comparsa di un fatto maligno nella società di cellule di cui sono parte e che viene considerata nel suo insieme.

Le indicazioni circa i mezzi con i quali viene controllata la riproduzione in una società di cellule emergono da analisi particolareggiate del ciclo cellulare.

L'indicazione principale è semplicissima: le cellule che non si dividono non presentano mai la fase S. Per contro, le cellule che presentano la fase S, quasi sempre la completano per cominciare poi a dividersi: la duplicazione dei cromosomi evidentemente implica anche la divisione finale. Cosí il controllo della divisione cellulare consiste nella supervisione di un'unica decisione: se una cellula si duplicherà o no. Tutto questo è vero ma è troppo semplice. Le cellule che non sono destinate a dividersi non sono bloccate nel passaggio dalla fase G_1 alla fase S e aspettano all'infinito la segnalazione per cominciare a duplicarsi. Alcuni studiosi del ciclo cellulare preferiscono pensare a esse come a cellule che non hanno affatto iniziato il ciclo. Da questo punto di vista, si distinguono due tipi di cellule: cellule che presentano un ciclo e cellule che non lo presentano. Nel corpo molti tipi di cellule specializzate appartengono alla seconda categoria e il loro processo verso la divisione è sempre bloccato. Pensiamo a questo fatto come al risultato dell'azione di controllo esercitata dall'organismo. Molti tipi di cellule che non presentano piú un ciclo, possono essere riattivate in questo senso mediante coltura in vitro, cioè sottraendole al controllo del corpo. Agenti cancerogeni devono provocare una ripresa del ciclo in cellule che non lo presentano piú.

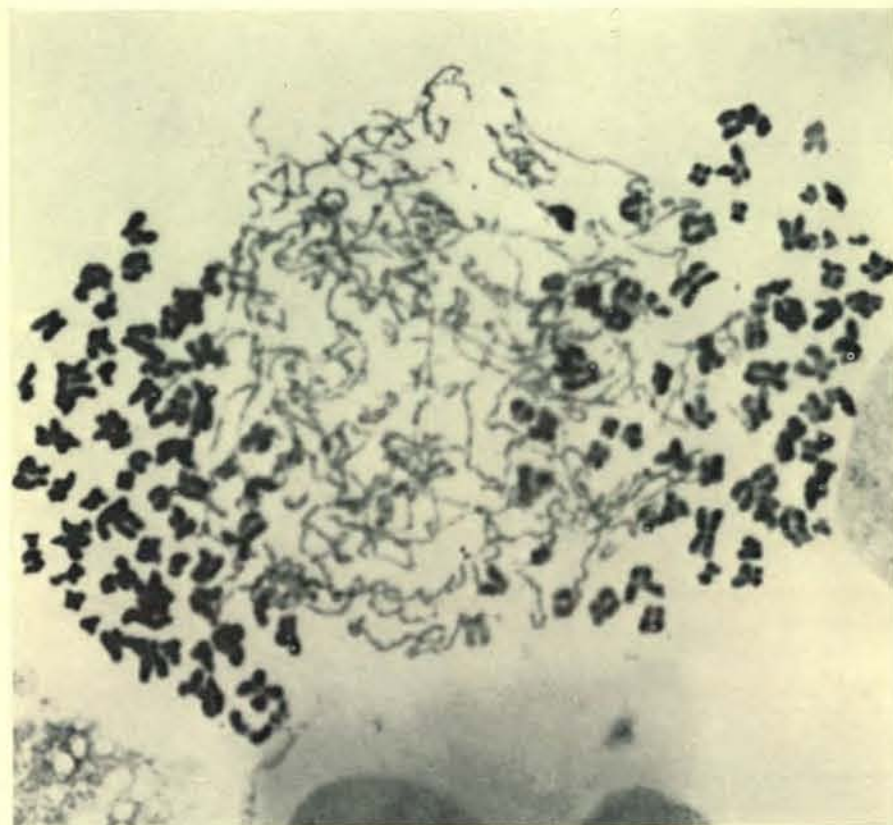
Anche la conversione di cellule prive di ciclo in cellule con ciclo può essere un fatto normale e importante. Un esempio di questo genere è costituito dai linfociti degli animali superiori. In queste piccole cellule, per la maggior parte del tempo, la crescita e la divisione non si verificano. Tuttavia, nelle reazioni immunitarie cominciano anch'esse a crescere e a dividersi, producendo cellule che portano alla formazione di anticorpi. Linfociti senza ciclo possono anche essere trasformati in linfociti con ciclo in laboratorio, se li si espone a certe proteine vegetali note come lectine. Quando linfociti che non mostrano alcun ciclo vengono stimolati artificialmente in questo modo, passa quasi un giorno prima che essi entrino nella fase S e comincino la duplicazione cromosomica. Lawrence A. Loeb e collaboratori dell'Istituto per la ricerca sul cancro di Filadelfia hanno notato che i linfociti stimolati devono produrre gli enzimi necessari per il processo di duplicazione, prima di poter entrare nella fase S. Essi sono ben lungi dall'essere bloccati nella fase G_1, pronti a passare alla fase S, quando avviene la segnalazione. Se viene stimolata una cellula che non presenta ciclo, a quanto pare essa deve prima effettuare i passaggi che una cellula dotata di ciclo generalmente esegue nella fase G_1.

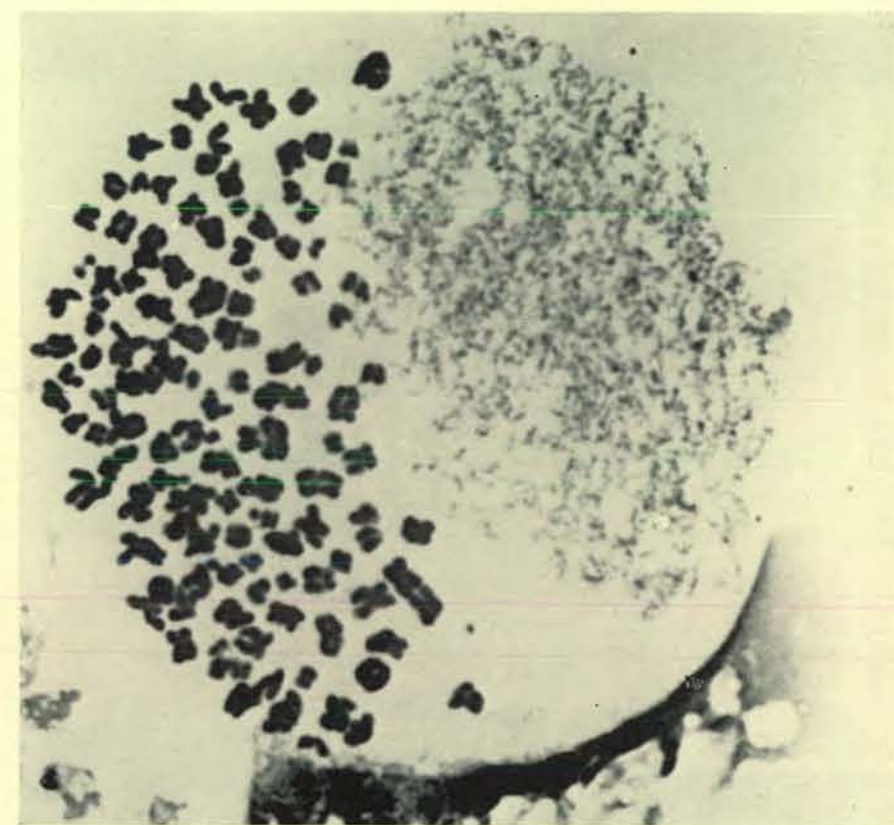
L'influenza che una società di cellule esercita sui cicli dei singoli membri è osservabile in situazioni semplici. Un esempio è costituito dall'« inibizione da contatto », studiata nelle colture di cellule di mammifero, ottenute in laboratorio. Le cellule crescono e si moltiplicano normalmente su un substrato solido, come il fondo di una piastra o di una beuta. Tuttavia la loro crescita cessa nel momento in cui viene raggiunta una certa densità di popolazione. Ciò accade quando il substrato è stato ricoperto da un unico strato di cellule. Come ha dimostrato Harry Rubin dell'Università di California a Berkeley, l'inibizione da contatto può essere evitata infettando la coltura di cellule con un virus cancerogeno. L'infezione trasforma le cellule in vario modo: esse possono cambiare come aspetto, non sono piú limitate a una conformazione monostratificata, ma crescono una sull'altra; se inoculate in un animale ospite, cresceranno in esso come cellule cancerose.

Alla stessa stregua di ciò che avviene nel corpo, il controllo della riproduzione cellulare nell'inibizione da contatto è realizzato interrompendo il ciclo della cellula prima che questa raggiunga la fase S e che cominci la duplicazione dei cromosomi. Di qualunque natura possano essere i mezzi, si tratta di un'azione della società di cellule, come complesso, sui singoli membri. Lo si può dimostrare sperimentalmente come segue. Se una coltura monostratificata di cellule viene punta o in qualche modo lesionata, il ciclo ricomincia. Ciò accade in tutte le parti della coltura e non soltanto nelle cellule lungo i margini della lesione. La riproduzione persiste poi fino a quando viene riempito tutto lo spazio vuoto. A questo punto il ciclo si blocca di nuovo.

È difficile immaginare che il ciclo cellulare si blocchi esclusivamente per il contatto tra cellule adiacenti. In primo luogo diversi tipi di cellule raggiungeranno gradi diversi di affollamento in condizioni diverse prima che il loro ciclo si arresti. In secondo luogo, l'inibizione da contatto può essere evitata provocando cambiamenti nell'ambiente, per esempio aggiungendo notevoli quantitativi di siero di sangue. Infine, alcuni tipi di cellule non sono soggetti affatto a questo tipo di inibizione.

Lo studio del ciclo cellulare ha portato a una certa comprensione del controllo della riproduzione delle cellule visto dall'interno di esse. Sappiamo che l'evento chiave sarà trovato nella supervisione della sequenza che porterà all'innesco della duplicazione cromosomica. Nel contempo, studi sul ciclo cellulare in organismi interi, o anche in semplici società come le colture di cellule che possono subire un'inibizione da contatto, ci portano verso un'altra domanda: come vengono organizzati dall'esterno gli eventi interni?

Possiamo limitare la domanda in vari modi. La società di cellule comanda i singoli cicli cellulari mediante sostanze circolanti del tipo degli ormoni? Esempi di questi possibili agenti sono i caloni, studiati da W.S. Bullough

La condensazione dei cromosomi può essere provocata in cellule che si trovano in altre fasi del ciclo, inducendo la loro fusione con una cellula in fase *M*. Qui cromosomi di una cellula in fase G_1, prematuramente condensati, appaiono come filamenti di cromatina (*al centro*). I filamenti sono singoli, diversamente da quelli della cellula in fase *M*.

Un secondo tipo di fusione, tra una cellula in fase *M* e una che ha superato la fase *S* ed è entrata nella fase G_2, provoca esso pure una condensazione prematura dei cromosomi della cellula in fase G_2. In questo caso, poiché i cromosomi della cellula hanno già subito una duplicazione, i filamenti di cromatina (*al centro*) appaiono doppi.

Il terzo tipo di fusione, tra una cellula nella fase *M* e una cellula nella fase *S*, ha un risultato caratteristico. La cromatina, condensatasi prematuramente, non forma filamenti ma si frammenta e polverizza (*a destra*). I tre esperimenti sono stati effettuati da Potu N. Rao e Robert T. Johnson del Medical Center dell'Università del Colorado a Denver.

dell'Università di Londra, e la promina e la retina, oggi allo studio da parte di Albert Szent-Gyorgyi al Marine Biological Laboratory di Woods Hole nel Massachusetts. Si dispone, inoltre, di una ricca statistica in favore del fatto che variazioni a carico di ioni e piccole molecole, normalmente presenti nell'ambiente cellulare esterno, possano avere un influsso sui cicli cellulari.

L'importanza della membrana cellulare

Ogni influenza che l'esterno può avere sull'interno viene intercettata dalla membrana cellulare. La parte avuta da questa nel controllo della riproduzione cellulare viene oggi esaminata con interesse e entusiasmo. La passione dei biologi nei riguardi della membrana cellulare si può riassumere in un'affermazione che ha un certo che di sarcastico: « ogniqualvolta le nostre abituali spiegazioni non valgono, troveremo la spiegazione finale nella membrana cellulare ». Questo non è, in realtà, sarcasmo. La membrana cellulare non è, in effetti, né rivestimento, né un filtro. È una parte attiva e responsabile della cellula: essa decide che cosa sta fuori e che cosa sta dentro e come l'esterno deve influire sull'interno. Le membrane cellulari hanno « facce » che permettono alle cellule di riconoscersi e di influenzarsi a vicenda. Esse sono anche sistemi di comunicazione e gli oggetti all'esterno di una cellula non agiscono necessariamente passando attraverso la membrana: possono semplicemente modificarla in modo che, a sua volta, fa produrre alla membrana dei cambiamenti nell'ambiente interno della cellula.

Oggi le superfici cellulari vengono studiate in vari modi: l'aspetto esterno può venire osservato nei minimi particolari con il microscopio elettronico a scansione. Un altro esempio è costituito dalla misurazione dei potenziali di membrana, impiegando elettrodi per determinare la differenza di tensione tra ambiente interno e esterno. Un gruppo di ricercatori del Dipartimento di embriologia della Carnegie Institution di Washington ha trovato che il potenziale di membrana si modifica durante il ciclo cellulare e, inoltre, che quest'ultimo viene bloccato da cambiamenti nell'ambiente esterno che inducono modificazioni di tale potenziale. Presso la Scuola di medicina dell'Università di Miami, il gruppo di Werner R. Loewenstein ha effettuato studi mediante elettrodi sulle connessioni tra cellule in reciproco contatto. I canali di comunicazione che tali connessioni realizzano permettono agli ioni e alle piccole molecole di passare da cellula a cellula. Questi ricercatori ritengono che le cellule passibili di una inibizione da contatto formino queste connessioni, mentre le altre cellule no.

Lo studio delle differenze superficiali tra cellule che possono essere soggette a un'inibizione da contatto e le altre cellule si sta dimostrando molto promettente in quanto proprio qui si può trovare una chiave per spiegare il controllo sul ciclo cellulare. Le superfici dei due tipi di cellule sono diverse. Max M. Burger della Princeton University ha trovato per primo che la membrana delle cellule che possono subire un'inibizione da contatto reagisce con quelle proteine vegetali che inducono le cellule che non presentano un ciclo ad averne uno. La reazione è facilmente osservabile: quando è presente la proteina, le superfici cellulari diventano appiccicose e le cellule si ammassano. Le cellule che non subiscono, invece, un'inibizione da contatto non sono influenzate dalla presenza della proteina. Gli studi sulla superficie cellulare, come quelli appena citati, progrediscono rapidamente. Se il controllo sul ciclo può essere rivelato dalla superficie della cellula, allora si hanno tutte le ragioni per rivolgersi alla membrana cellulare per trovare legami tra controllore e controllato!

Oggi chiunque studi il ciclo cellulare deve aspettarsi di essere interrogato sulle possibili correlazioni tra ciclo cellulare e cancro. Se la conoscenza dei problemi ha già qualche importanza nella soluzione dei problemi stessi, si può dire che il problema del cancro è il problema del ciclo cellulare. Molti tipi di proliferazione maligna, che vanno sotto il nome di cancro, hanno solo un unico attributo letale in comune: tutte le cellule implicate perseguono il loro ciclo senza limitazione.

Gli studi del ciclo cellulare visto dall'interno ci dicono che cosa deve essere frenato: l'ingresso della cellula nella fase *S* e la duplicazione cromosomica. Il freno deve provenire dall'esterno. La cellula da sola non può innescare e disinnescare i propri cicli. Il controllo del ciclo cellulare dall'esterno si nota in collettività semplici, per esempio nelle colture di cellule soggette a inibizione da contatto, e così pure nella società complessa costituita dell'intero organismo. Gli studi sulla membrana cellulare cercano di individuare i meccanismi con cui i fattori esterni controllano gli eventi interni. Interno, esterno, superficie: ciascuno di questi tre elementi potrebbe fornire in ugual misura le armi necessarie per debellare ogni crescita incrontrollata.

L'astrolabio

Questo strumento scientifico medievale veniva usato per osservazioni astronomiche e terrestri. Esso serviva anche come calcolatore analogico, particolarmente per la determinazione dell'ora locale

di J. D. North

L'astrolabio fu lo strumento astronomico piú diffuso del Medio Evo. Le sue origini risalgono all'antichità ed esso era ancora comune nel seicento. Un uso dello strumento era legato all'osservazione: l'astrolabio serviva infatti a determinare le distanze angolari del Sole, della Luna, dei pianeti o delle stelle dall'orizzonte o dallo zenit. Poteva essere usato anche per determinare l'altezza di montagne e di torri e per le misurazioni topografiche in generale. Molto maggiore fu però l'importanza dell'astrolabio come strumento di calcolo. Esso consentiva all'astronomo di calcolare la posizione del Sole e delle stelle principali rispetto al meridiano e all'orizzonte, di determinare la propria latitudine geografica e la direzione del nord vero (anche di giorno, quando le stelle non erano visibili) e di dedicarsi ad attività di prestigio e di lucro come la redazione di oroscopi. Soprattutto, nei tempi in cui non si disponeva ancora di orologi attendibili, l'astrolabio forniva al suo possessore un mezzo per determinare l'ora di giorno o di notte, purché fossero visibili il Sole o una qualche stella riconoscibile segnata sull'astrolabio.

In questa figura schematica, che illustra il diritto dell'astrolabio, sono visibili le parti piú importanti. La rete perforata, o ragno, è una riproduzione del cielo. Le punte aguzze indicano la posizione delle stelle principali. Il cerchio eccentrico in alto è l'eclittica, ossia la traiettoria annua del Sole in cielo. La rete ruota attorno a un perno che la mantiene solidale al disco sottostante. La posizione del perno corrisponde al polo nord celeste. Le linee incise sul disco rappresentano coordinate che rimangono immobili rispetto a un osservatore sulla Terra. La rotazione della rete illustra il moto diurno delle stelle relativamente all'osservatore.

Un nome piú preciso per lo strumento che sto descrivendo è quello di astrolabio piano o planisferico. Esistono altri tre tipi di astrolabio: l'astrolabio lineare, l'astrolabio sferico e l'astrolabio nautico. L'astrolabio lineare era uno strumento difficile da usare e da capire e veniva prodotto raramente. Anche l'astrolabio sferico era raro; aveva la forma di un globo, pur avendo molto in comune con l'astrolabio planisferico. L'astrolabio nautico fu uno strumento relativamente tardo; a quanto si sa fu usato per la prima volta solo poco tempo prima dell'epoca di Colombo. Era uno strumento rozzo, che serviva principalmente a determinare l'altezza del Sole, della Luna o di stelle al di sopra dell'orizzonte e che veniva usato in gran parte per gli stessi fini cui sarebbe stato adibito nei secoli successivi il sestante. Esso constava sostanzialmente di un regolo, l'alidada, che ruotava su un perno. Ai due estremi dell'alidada era un traguardo con un piccolo foro per la visione. Il marinaio reggeva lo strumento in posizione verticale infilando il pollice nell'anello fissato a un apposito sostegno detto « trono » e faceva ruotare l'alidada in modo da poter osservare l'oggetto celeste attraverso i fori dei due traguardi o mirini. Egli leggeva allora l'altezza dell'oggetto sulla scala in gradi tutt'attorno al bordo. (Determinando l'altezza del Sole, egli avrebbe fatto sí che un traguardo proiettasse la sua ombra sull'altro, per non ferire il proprio occhio mediante l'osservazione diretta dell'astro.) L'astrolabio nautico era di ottone massiccio in modo che il peso gli conferisse maggiore stabilità, ed era anche forato in modo che il vento avesse su di esso la minore presa possibile.

D'ora in poi, parlando dell'astrolabio planisferico, lo chiameremo semplicemente astrolabio, visto che era il tipo di gran lunga piú comune. Al fine di capire pienamente anche i suoi usi piú semplici, è necessario esaminarne la forma e raccontare come l'abbia acquistata.

Entrambe le facce dell'astrolabio recavano informazioni utili. In generale l'alidada si trovava sul rovescio. Il rovescio era un insieme d'informazioni che in linea di massima avrebbero potuto essere immagazzinate altrove. Di solito esso riportava numerose scale e tavole la cui precisa natura tendeva a mutare di secolo in secolo.

Una scala che si trovava su quasi tutti gli astrolabi è il calendario, che

Astrolabio smontato al fine di metterne in evidenza le relazioni fra le varie parti. La madre è il corpo principale dell'astrolabio. I climi, o timpani, sono dischi con incise le coordinate proprie delle varie latitudini, di solito quelle dei paesi in cui il proprietario dell'astrolabio si recava comunemente. L'alidada è un regolo rigido che veniva usato per osservare oggetti celesti e determinarne l'altezza. Essa si trovava sul rovescio dell'astrolabio (*si veda la figura alla pagina 71*) ed era libera di ruotare come la rete La rete è collocata al di sopra di tutti i climi, i quali sono contenuti all'interno della madre. Il perno o chiave passa per il centro di tutti i dischi ed è assicurato dal cavallo, una spina il cui estremo aveva tradizionalmente la forma di una testa equina.

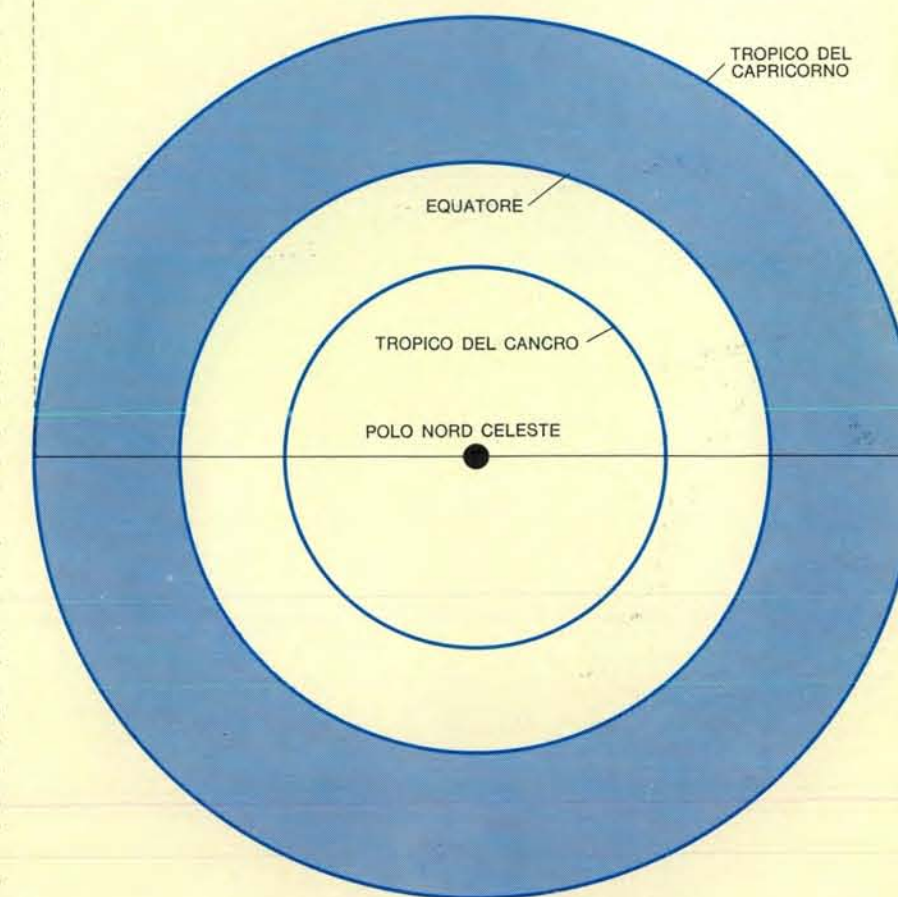
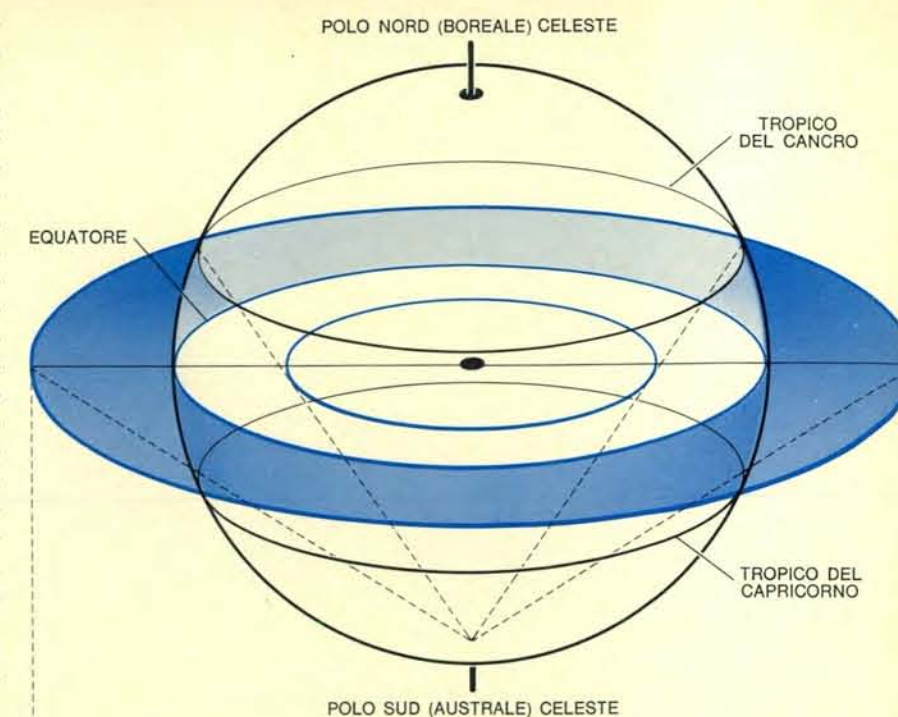
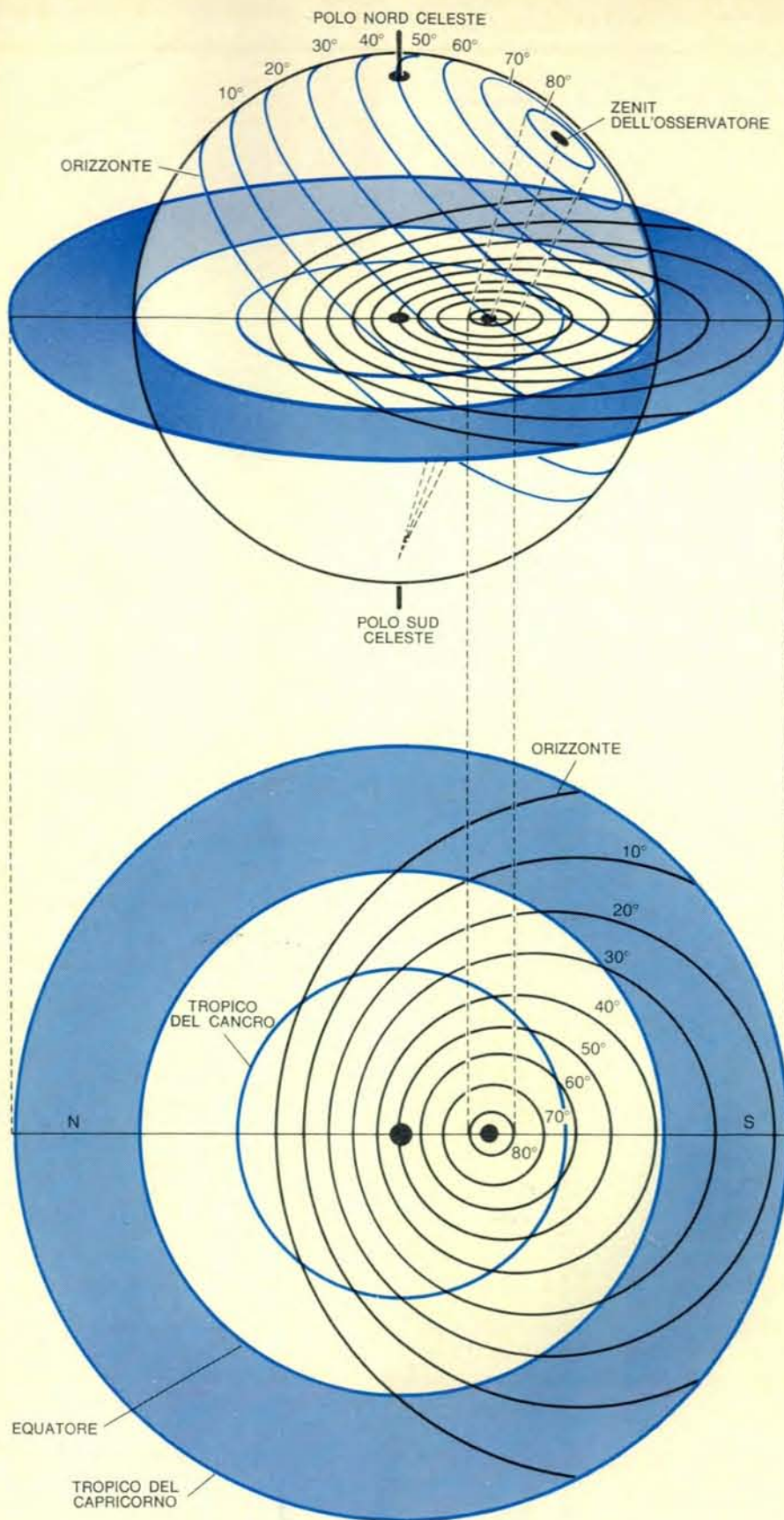
Astrolabio persiano, eseguito nel XII secolo, dal disegno molto semplice, come la maggior parte degli astrolabi piú antichi. La rete è regolare e gli indicatori delle stelle sono rettilinei e disadorni.

L'astrolabio nautico era usato principalmente per determinare l'altezza di corpi celesti al di sopra dell'orizzonte. L'alidada si trova sul diritto. Questo astrolabio è spagnolo ed è datato 1602.

Astrolabio moresco del duecento. Sulla rete sono pomi in rilievo per facilitarne la rotazione. Presentiamo sia il diritto (*fotografia a sinistra*) sia il rovescio (*fotografia a destra*) dello strumento per illustrare la collocazione della rete e dell'alidada. Gli astrolabi riprodotti in questa pagina sono del National Museum of History and Technology della Smithsonian Institution.

rappresentava i giorni e i mesi e metteva in relazione la posizione del Sole con la data nel corso dell'anno. Se le stelle fossero visibili di giorno, sarebbe piú facile stimare il moto apparente del Sole contro lo sfondo delle stelle. Questo moto è ovviamente una conseguenza del moto della Terra attorno al Sole; man mano che la Terra procede nella sua orbita, il Sole ci dà l'impressione di spostarsi rispetto alle stelle. Spesso è perciò conveniente fingere che la Terra sia in quiete al centro di una grande sfera sulla cui superficie sarebbero collocati tutti gli oggetti celesti. Le stelle e perfino i pianeti si trovano a distanze cosí grandi in confronto alle dimensioni della Terra che la sfera celeste è una convenzione ragionevole finché ci si occupa soltanto della direzione degli oggetti celesti rispetto all'osservatore.

La traiettoria che il Sole percorre sulla sfera celeste è l'eclittica e il Sole la percorre per intero in un anno. I pianeti sembrano muoversi all'interno di una banda di cielo di alcuni gradi ai due lati dell'eclittica; questa banda è nota col nome di zodiaco. È possibile indicare la posizione approssimativa del Sole sull'eclittica (la sua posizione nello zodiaco) per qualsiasi data dell'anno. Gli anni bisestili presentano un piccolo problema, che non è però di difficile soluzione visto che la precisione richiesta è solo di una frazione di grado relativamente grande.

La scala calendariale dell'astrolabio reca incisi i giorni e i mesi. C'è anche una scala dello zodiaco, che normalmente è concentrica con la scala delle date e la cui funzione è quella di stabilire una correlazione tra le date e la posizione del Sole sull'eclittica. La posizione del Sole può essere indicata come una longitudine celeste da zero a 360 gradi, calcolati a partire da un punto d'origine opportuno. Nel Medio Evo fu usata una variante di questo sistema: lo zodiaco era diviso in 12 segni. Ogni segno comprendeva 30 gradi e recava il nome di una costellazione importante. Di fatto, in conseguenza della lenta precessione degli equinozi, dovuta a sua volta a un movimento conico dell'asse della Terra, da molto tempo le costellazioni si erano spostate nei segni contigui. In parte a causa della precessione e in parte per il fatto che il tempo impiegato dalla Terra a compiere un'orbita attorno al Sole non corrisponde esattamente a 365 giorni e un quarto, col passare degli anni ci sono piccoli spostamenti della posizione del Sole per ogni data particolare. Questi spostamenti possono essere considerati senza grande diffi-

La proiezione stereografica dell'equatore e dei tropici dimostra come questi cerchi della sfera celeste (*in alto*) siano proiettati sul disco dell'astrolabio (ossia sulla madre o su un clima) o sulla rete. Sulla maggior parte degli astrolabi viene usato come piano della proiezione il piano dell'equatore (o un piano ad esso parallelo). Una linea viene prolungata dal polo celeste australe fino al punto desiderato sulla sfera celeste (in questo caso uno dei tropici o l'equatore). Il punto in cui questa linea interseca il piano della proiezione indica la posizione di quel punto celeste sulla carta. La registrazione sulla carta di una serie di tali punti fornisce le coordinate. L'equatore e i tropici si trovano ad angoli retti rispetto all'asse della proiezione. Essi risultano quindi cerchi concentrici e sono incentrati sul punto che rappresenta il polo celeste boreale (*in basso*).

Proiezione stereografica degli almucantarat, o cerchi di uguale altezza, concentrici con lo zenit dell'osservatore e paralleli all'orizzonte. Sul piano di proiezione essi vengono ad avere forma circolare ma non un centro comune. Nella figura lo zenit dell'osservatore si trova 40 gradi a nord dell'equatore. Il suo orizzonte e gli almucantarat sono illustrati dapprima come appaiono sulla sfera celeste (*in alto*). La proiezione stereografica ha la proprietà che i cerchi su una sfera rimangono cerchi anche quando vengano proiettati su una superficie piana. Nella proiezione i centri degli almucantarat si trovano sulla linea (*NS*) che passa per il polo nord e per lo zenit dell'osservatore (*in basso*).

coltà nella redazione dei calendari; sugli astrolabi, invece, non era possibile tenerne conto con facilità e una scala calendariale medievale presenta probabilmente una discordanza di 10 o 11 giorni nei confronti di una attuale.

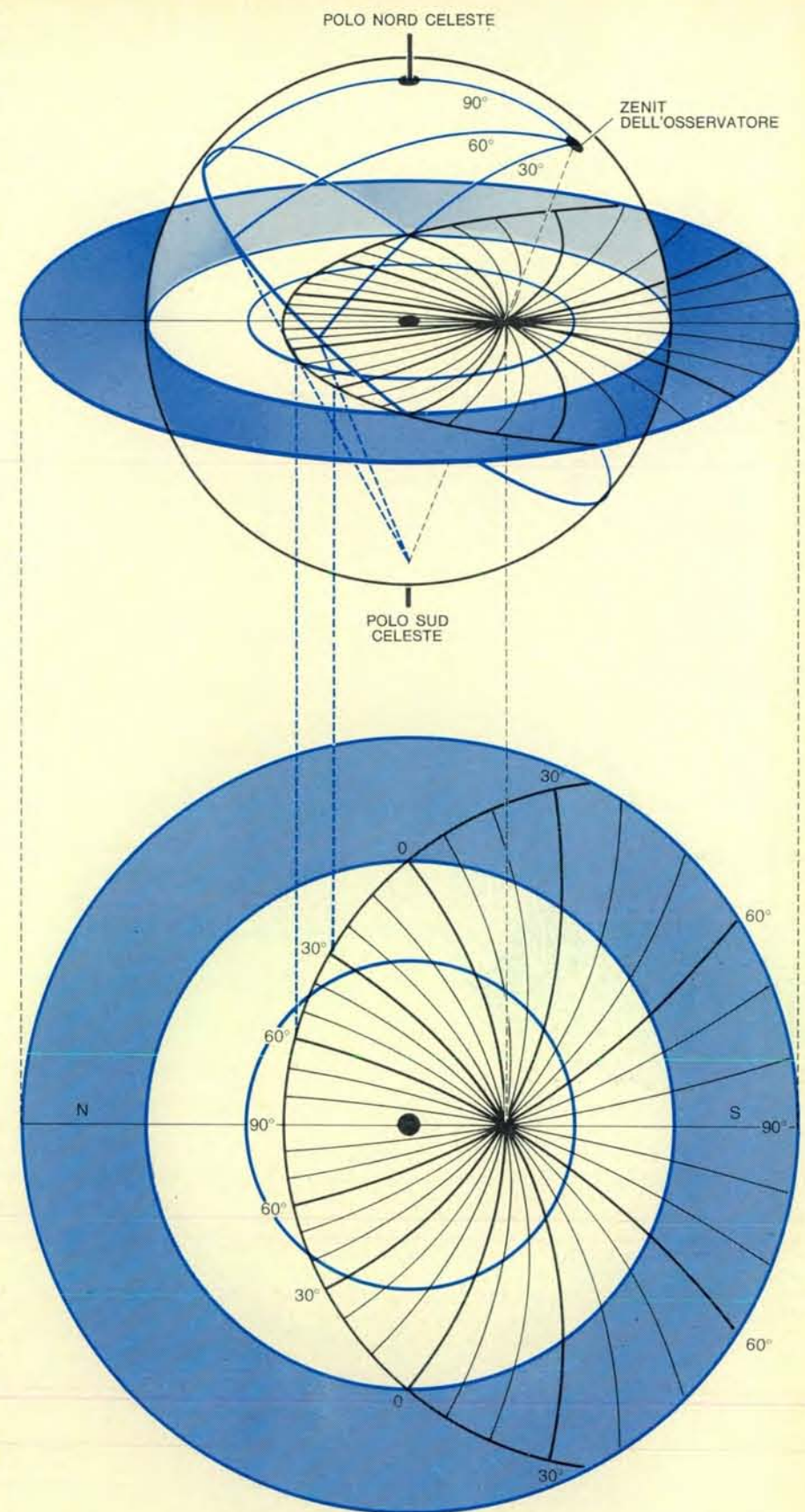
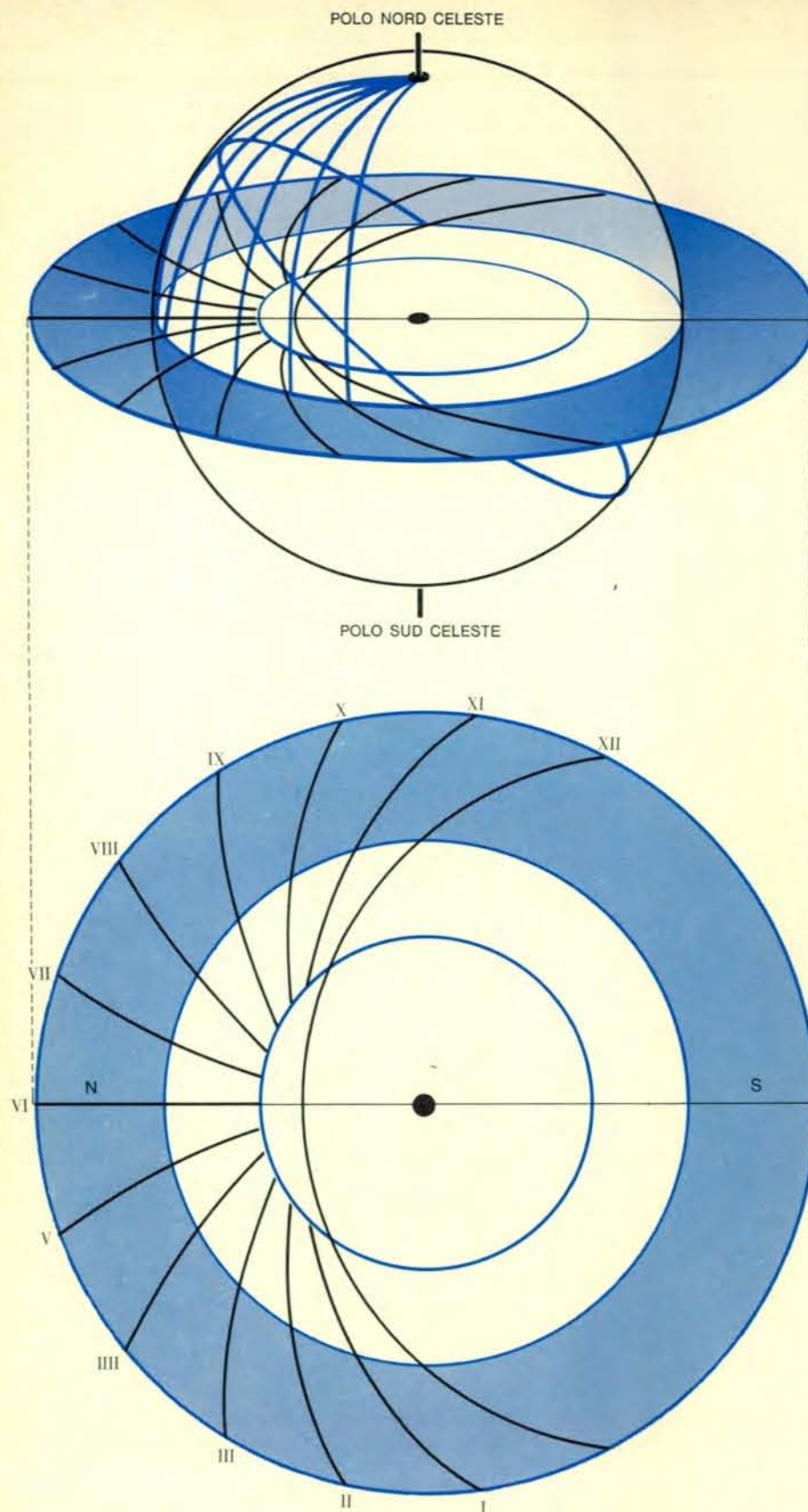
Il diritto dell'astrolabio è piú importante del rovescio. Esso consta di due parti principali. Una, la rete o ragno, è un disco traforato, fatto di solito di ottone, come il resto dell'astrolabio, ed è disposta al di sopra di un disco non traforato. La rete è una rappresentazione del cielo. Le punte degli indici contrassegnano la posizione delle stelle piú brillanti, un cerchio eccentrico rappresenta l'eclittica; ci sono poi parti di tre cerchi che rappresentano l'equatore celeste e i tropici del Cancro e del Capricorno. La rete è mobile attorno a un perno centrale. Il perno, attorno al quale ruota anche l'alidada sul rovescio, è mantenuto in posizione da un dente che passa per un foro nella punta del perno. La parte piú massiccia del dente o spina aveva tradizionalmente la forma di una testa di cavallo e perciò la spina era chiamata spesso « cavallo ». Se a quell'epoca fosse stato facilmente disponibile qualche materiale trasparente durevole, la rete sarebbe stata fatta probabilmente con esso; chiunque desiderasse oggi costruire un astrolabio semplice potrebbe usare un foglio di plastica e stamparvi su la carta delle stelle.

L'altra parte importante dell'astrolabio è il disco sottostante alla rete. Esso reca incisi numerosi cerchi e linee rette rappresentanti coordinate, le quali sono fisse rispetto a un dato osservatore. Il centro dell'astrolabio, sul quale è imperniata la rete, rappresenta il polo nord celeste, attorno al quale le stelle paiono ruotare. Disposti concentricamente rispetto a esso sono il Tropico del Cancro, l'equatore celeste o equinoziale e il Tropico del Capricorno. Questi cerchi possono essere rappresentati sia sulla rete sia sul disco sottostante. Sul disco c'è una linea che rappresenta l'orizzonte dell'osservatore e un punto che ne indica lo zenit. C'è poi un insieme di almucantarat, o cerchi di altezza costante, che sono paralleli all'orizzonte e circondano lo zenit. Ci sono anche linee di azimut costante, le quali si presentano come archi di cerchi che si irraggiano dallo zenit e scendono fino all'orizzonte.

È chiaro che la distanza che separa il polo e lo zenit dell'osservatore sul disco dell'astrolabio dipende dalla latitudine geografica dell'osservatore. Se egli vivesse al polo nord i due punti coinciderebbero, mentre se vivesse all'equatore sarebbero separati di una distanza corrispondente a 90 gradi sul disco dell'astrolabio. La necessità di disporre di un disco diverso per ogni latitudine a cui lo strumento dovesse essere usato era sempre una fonte di grattacapi per il proprietario dell'astrolabio. Egli avrebbe dovuto avere un disco per la sua latitudine abituale e uno per ogni altra latitudine a cui si sarebbe trovato nel corso dei suoi viaggi.

Tali dischi erano spesso chiamati climi per una chiara estensione del significato del termine. Un astrolabio poteva avere anche quattro, cinque o piú climi; ogni disco era inciso su entrambe le facce, e tutti venivano alloggiati nella madre, ossia nel corpo principale dell'astrolabio. Essi venivano a trovarsi sotto la rete ed erano fissati all'astrolabio dal perno o chiavetta e dal cavallo (*si veda la figura alla pagina 63*). C'erano astrolabi che potevano essere usati a qualsiasi latitudine con un unico disco, ma non erano facili da usare e non furono mai molto diffusi.

In che modo le stelle e le coordinate della sfera celeste erano registrate sulla rete e sui climi? Supponiamo che l'osservatore si trovasse al centro di una grande cupola emisferica su cui, a intervalli di 5 o di 10 gradi, fossero incisi gli almucantarat e le coordinate di azimut costante. Grazie a quest'insieme di linee egli sarebbe stato in grado di misurare gli spostamenti apparenti delle stelle nel cielo notturno dovuti alla rotazione diurna della Terra. Se l'osservatore scattasse una fotografia con un tempo di esposizione abbastanza lungo, le capocchie di spillo della luce delle stelle lascerebbero in fotografia tracce lineari in forma di archi di cerchi concentrici attorno al polo nord celeste. (Conformandoci fedelmente agli usi del Medio Evo, trascureremo le esigenze e i pregiudizi degli abitanti dell'emisfero australe.)

Come è possibile realizzare una carta piana di un globo terrestre, cosí è possibile rappresentare in piano le due sfere introdotte qui: il sistema fisso delle coordinate e la sfera mobile del cielo. Se le carte devono essere fatte di ottone e devono servire per tutti i tempi, è necessario tener conto di certi requisiti pratici. Se le due carte devono essere disposte in modo tale che una sia imperniata e mobile attorno a un punto fisso dell'altra, come avviene nell'astrolabio, questo punto dovrebbe essere un polo, preferibilmente il polo nord se lo strumento dev'essere usato nell'emisfero boreale. Inoltre le proiezioni di entrambe le carte dovrebbero essere uguali per tutte le posizioni della rete e del disco l'una rispetto all'altro; una proiezione non sa-

La proiezione stereografica delle linee di uguale azimut è una serie di cerchi massimi che si estendono dall'orizzonte allo zenit. Essi intersecano perciò il cerchio dell'orizzonte e gli almucantarat (*non raffigurati*) ad angoli retti (*in alto*). Gli angoli formati dall'intersezione di cerchi su una sfera rimangono inalterati in proiezione stereografica su una superficie piana. Perciò sull'astrolabio le linee di azimut uguale saranno archi di cerchio intersecanti le linee dell'orizzonte e degli almucantarat (*anche qui non raffigurati*) ad angoli retti. La maggior parte degli astrolabi presentano soltanto le linee di eguale azimut che apparirebbero al di sopra dell'orizzonte dell'osservatore (*in basso*).

La proiezione stereografica degli angoli orari colloca sul disco dell'astrolabio l'ultimo insieme di coordinate. L'intero ciclo di un giorno è diviso in 24 ore. Quando il tempo veniva computato in ore di durata ineguale, come qui, sia il periodo di luce diurna, sia il periodo di buio venivano divisi ciascuno in 12 parti uguali, senza tener conto della loro diversa durata. Le ore del giorno avevano quindi una durata diversa rispetto alle ore notturne. Le linee orarie venivano tracciate solitamente solo al di sotto della linea dell'orizzonte. Quelle porzioni dei cerchi concentrici dell'equatore e dei tropici vengono divise in 12 parti uguali, a cominciare dai punti d'intersezione con l'orizzonte occidentale. I punti corrispondenti vengono poi connessi con curve piane.

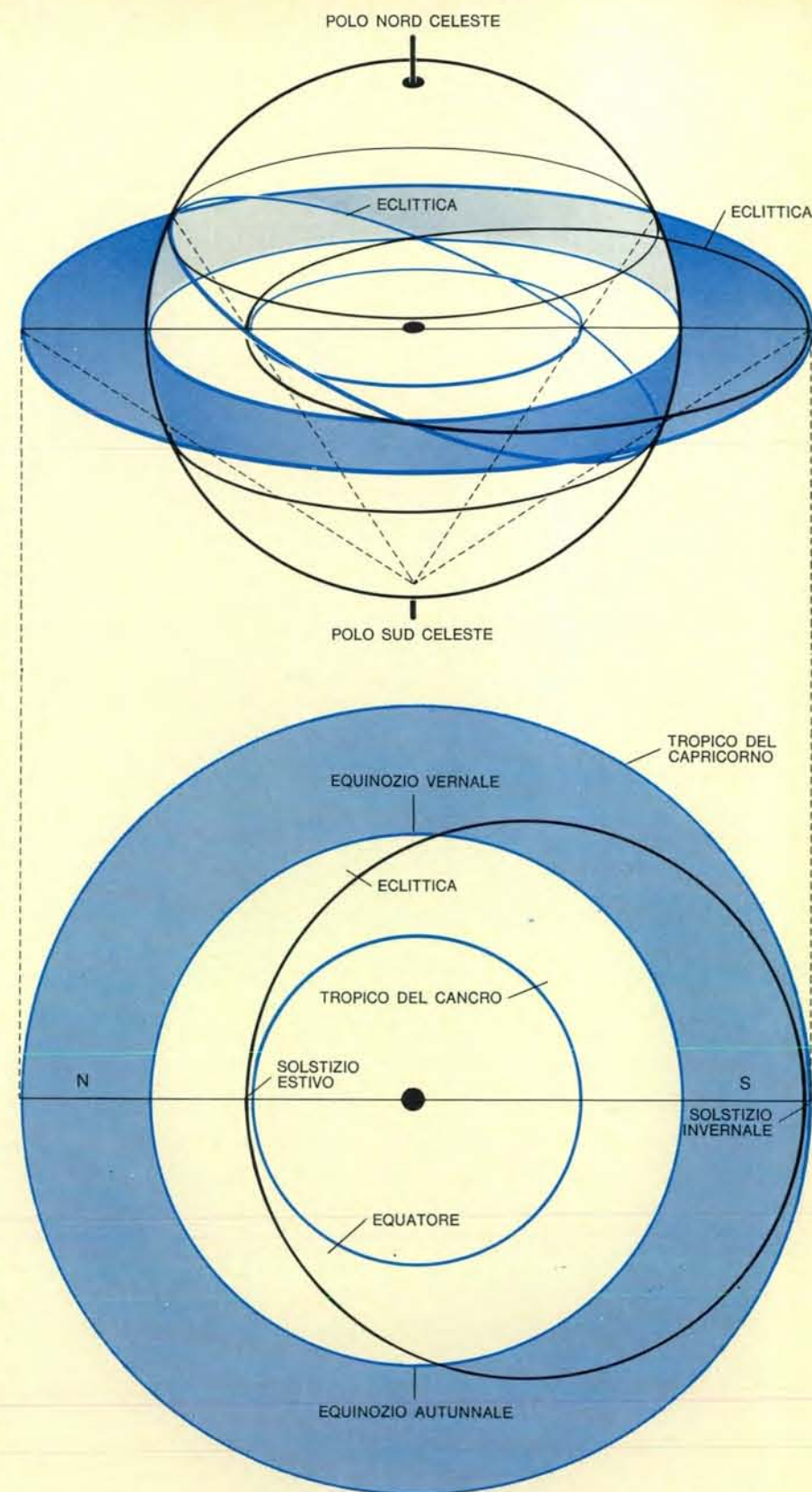
rebbe affatto buona se avesse come conseguenza una distorsione della rete nel corso della sua rotazione.

La proiezione stereografica era mirabilmente idonea a soddisfare le esigenze dell'utente dell'astrolabio. Essa ha la proprietà che i cerchi di una sfera conservano la figura circolare quando vengono proiettati su una superficie piana, e che gli angoli formati da cerchi che s'intersecano sulla sfera rimangono immutati in proiezione. Pur essendoci ragioni di sospettare che in tempi molto antichi fossero usate convenzioni diverse, la convenzione che fu seguita quasi universalmente per piccoli astrolabi fu quella di eseguire proiezioni stereografiche dal polo sud della sfera celeste sul piano dell'equatore. Dal polo sud veniva tracciata una linea verso l'oggetto della sfera celeste di cui si desiderava rappresentare la posizione; il punto in cui la linea intersecava il piano della proiezione indicava la collocazione dell'oggetto celeste sulla carta. Numerosi punti del genere venivano segnati sulla carta al fine di facilitare la determinazione delle coordinate.

Con la proiezione stereografica, quanto piú una stella australe è vicina al polo sud celeste, tanto piú lontana risulterà dal polo celeste boreale sul piano di proiezione, ossia sulla rete. La proiezione dell'intera sfera celeste ha dimensioni potenzialmente infinite. In pratica la rete viene costruita quasi invariabilmente poco piú grande di quanto sia necessario per comprendervi il Tropico del Capricorno. Le stelle sono rappresentate sulla rete, come si è detto, dalle punte di aguzzi indicatori di ottone. In linea di massima questi indicatori potevano essere incurvati dopo qualche tempo per tener conto del movimento di precessione dell'asse della Terra (anche se non è il caso di avere preoccupazioni del genere in relazione a periodi di mezzo secolo o anche meno). Poiché però era piú probabile che una punta si piegasse accidentalmente, gli indici venivano fatti di solito il piú possibile rigidi. I cerchi dei tropici e dell'equatore celeste non erano affatto necessari sulla rete, comparendo anche sul disco sottostante, e la loro funzione si riduceva per lo piú semplicemente a quella di sostegni per gli indicatori delle stelle.

L'equatore e i tropici sono perpendicolari all'asse della proiezione. In proiezione essi risultavano quindi cerchi concentrici alla rete e incentrati sul polo nord (rappresentato dal perno). Inoltre qualsiasi graduazione si fosse voluta rappresentare sull'equatore della sfera celeste, essa sarebbe risultata riprodotta in modo uniforme sull'equatore proiettato in piano. Nessuna di queste proprietà appartiene al cerchio piú importante sulla rete, ossia l'anello che rappresenta l'eclittica. Il centro dell'anello dell'eclittica differisce dal centro dell'equatore e dei tropici per il fatto che il piano dell'equatore terrestre è inclinato di 23 gradi e mezzo rispetto al piano dell'orbita della Terra. Le longitudini sono misurate sull'eclittica partendo dall'equinozio vernale, uno dei due punti in cui l'eclittica interseca l'equatore celeste. Questo punto equivale all'inizio del segno dell'Ariete; quando il Sole si trova nel « primo punto dell'Ariete » il giorno e la notte hanno ugual durata.

All'equinozio vernale il Sole interseca l'equatore passando dall'emisfero sud all'emisfero nord e percorre il segno dell'Ariete in direzione di quello del Toro nel suo procedere lungo l'eclittica. Quando l'astro raggiunge il punto dell'eclittica piú settentrionale, 23 gradi e mezzo a nord dell'equatore, nel solstizio estivo, abbandona il segno dei Gemelli e passa nel Cancro; di qui il nome del tropico che si trova nell'emisfero boreale, alla latitudine di +23 gradi e mezzo. Continuando a percorrere l'eclittica, il Sole entra infine nella Bilancia quando l'eclittica interseca nuovamente l'equatore celeste, passando però questa volta da nord a sud. Ciò ha luogo all'equinozio d'autunno, quando giorno e notte hanno nuovamente ugual durata. Il Sole raggiunge poi la sua massima distanza dall'equatore a sud (23 gradi e mezzo) nel solstizio d'inverno, entrando nel Capricorno (di qui il nome del Tropico del Capricorno nell'emisfero sud, alla latitudine di –23 gradi e mezzo). Il percorso annuo del Sole è indicato dal bordo esterno dell'anello dell'eclittica sulla rete.

In che modo è costruito, sulla rete, l'anello dell'eclittica? Tutto ciò che si richiede è la registrazione dei punti dei solstizi estivo e invernale (*si veda la figura a destra*). Poiché nella proiezione stereografica in piano i cerchi rimangono cerchi, questi due punti definiscono il diametro del cerchio dell'eclittica. Il centro geometrico dell'eclittica giacerà esattamente al centro di questa linea, in posizione equidistante dai due punti. Il cerchio dell'eclittica, una volta tracciato, intersecherà l'equatore nei punti corrispondenti agli equinozi. (Accade cosí che il centro geometrico dell'eclittica cada sempre in un punto tale che l'angolo formato agli equinozi delle linee condotte al centro dell'eclittica e al centro della rete è il doppio di 23 gradi e mezzo o, piú precisamente, il doppio di qualsiasi

La proiezione stereografica dell'eclittica è usata per la rete invece che per il disco dell'astrolabio. L'eclittica rappresenta il percorso annuo apparente del Sole sulla sfera celeste qual è osservato dalla Terra. L'equatore terrestre è inclinato di 23 ½° rispetto al piano dell'eclittica, cosicché quest'angolo è riprodotto sulla rete dell'astrolabio. Tutto ciò che si richiede per tracciare l'eclittica è che si segni il punto del solstizio estivo sul Tropico del Cancro e il punto del solstizio invernale sul Tropico del Capricorno. Questi due punti definiscono il diametro del cerchio dell'eclittica, il cui centro si trova nel punto di mezzo di tale linea. L'eclittica interseca l'equatore in punti corrispondenti all'equinozio vernale (primo giorno di primavera) e all'equinozio autunnale (primo giorno d'autunno). L'eclittica è divisa in 12 segni zodiacali partendo dal punto che rappresenta l'equinozio vernale. Le linee divisorie si irraggiano dal polo nord celeste.

valore venga accettato per l'angolo che l'eclittica fa col piano dell'equatore celeste.)

Gli almucantarat sono tracciati sul disco dell'astrolabio sottostante alla rete in modo assai simile. L'orizzonte dell'osservatore è inclinato rispetto all'equatore celeste di 90 gradi meno la latitudine geografica dell'osservatore (*si veda la figura alla pagina 66*). Per trovare i due punti che determinano ciascun almucantarat, occorre ricordare che gli almucantarat non sono cerchi massimi in piani che passino per il centro della Terra, bensí sono piccoli cerchi paralleli all'orizzonte. Una volta disegnati, essi ci appaiono come una serie di cerchi attorno allo zenit dell'osservatore, ma non concentrici con esso. Tutti i loro centri giacciono sul meridiano.

Molto piú difficile è costruire linee di uguale azimut. Queste linee sono una serie di cerchi massimi che si estendono dall'orizzonte allo zenit e intersecano il cerchio dell'orizzonte e gli almucantarat ad angoli retti. Poiché la proiezione stereografica lascia gli angoli inalterati, le linee di uguale azimut sul disco dell'astrolabio saranno archi di cerchio che conservano questa proprietà. In generale gli astrolabi presentano solo quelle parti delle linee di uguale azimut che appaiono al di sopra dell'orizzonte dell'osservatore (*si veda la figura alla pagina 67*).

Prima di volgerci a considerare alcuni usi dell'astrolabio, che cosa possiamo dire della sua storia? La teoria della proiezione stereografica può essere fatta risalire a uno tra i massimi astronomi greci, Ipparco. Egli era nato attorno al 180 a.C. a Nicea, non lontano dalla moderna Istanbul, ed eseguí osservazioni astronomiche a Rodi e ad Alessandria. Purtroppo la maggior parte di ciò che sappiamo di lui è di seconda mano. Una tra le fonti piú importanti su di lui è l'astronomo alessandrino Tolomeo, il quale scrisse circa quattro secoli dopo. Tolomeo fu forse il massimo astronomo del mondo antico. La sua opera piú importante, nota oggi col titolo d'origine araba *Almagesto*, non contiene alcun accenno all'astrolabio planisferico. Nel suo *Planisphaerium* ci sono però accenni al « ragno » dello « strumento oroscopico » i quali suggeriscono che a quell'epoca dovesse esistere uno strumento di forma simile a quella del futuro astrolabio. Il *Planisphaerium* è un trattato non sull'astrolabio, bensí sulla proiezione stereografica. Esso è noto solo attraverso una traduzione latina di Ermanno di Carinzia (1143 d.C.).

Altri scienziati oltre a Tolomeo citano l'astrolabio, ma molte di queste citazioni sono ambigue. La piú antica descrizione della costruzione e uso dello strumento che ci sia pervenuta fu scritta nel VI secolo da Giovanni Filopono di Alessandria. Un secolo dopo Severo Sebokht scrisse sull'argomento in siriaco. Da questo periodo in avanti lo strumento divenne relativamente ben noto a giudicare dai molti trattati diversi a esso dedicati sia nel mondo islamico sia in quello cristiano. Il primo trattato europeo sull'argomento fu scritto da Ermanno di Reichenau (noto anche come Ermanno Contratto o lo Storpio), un monaco di Reichenau morto nel 1054.

Molto piú nota nell'Europa medievale fu un'opera scritta originariamente in arabo da Māshā'allāh, che si ritiene fosse un ebreo egiziano. Essa fu tradotta in latino nel 1276 e costituí la base dell'unico buon trattato sull'astrolabio in inglese nel basso Medio Evo, ossia di quello scritto un secolo dopo niente di meno che da Geoffrey Chaucer.

La sua opera, intitolata *Trattato sull'astrolabio*, risale al 1392 circa. Essa ci è conservata in oltre una ventina di codici manoscritti di epoca molto antica. In alcuni di essi è presente il sottotitolo *Pane e latte per bambini*. Il sottotitolo fu aggiunto probabilmente da un copista sorpreso dalle osservazioni iniziali di Chaucer in un'opera che avrebbe dovuto essere considerata piuttosto una galletta per adulti. L'opera comincia cosí: « Mio piccolo Ludovico, vedo chiari i segni della tua capacità di apprendere le scienze del numero e della proporzione, e ho in mente il tuo vivo desiderio di imparare specialmente il contenuto dei trattati sull'astrolabio ». Chaucer procede delineando il contenuto del trattato, che di fatto pare non sia mai stato portato a termine. Egli spiega l'esigenza di un'opera in inglese e ricorda il suo debito nei confronti di astronomi precedenti. È un peccato che per i lettori moderni il suo inglese sia altrettanto difficile di quanto lo era il latino per Ludovico.

Nel cinquecento l'avvento della stampa e il costante perfezionamento delle tecniche dell'incisione in funzione dell'illustrazione dei libri avevano dato origine a numerosi splendidi nuovi trattati sull'astrolabio. Questi trattati ebbero a loro volta una parte in alcuni

Un disco d'astrolabio completo rappresenta tutte le coordinate quali appaiono rispettivamente nell'uno o nell'altro clima. L'illustrazione comprende a un tempo tutte le proiezioni stereografiche illustrate singolarmente nelle figure alle pagine precedenti.

progressi sensazionali nella costruzione di strumenti. Gli astrolabi acquistarono dimensioni maggiori, ricevettero piú decorazioni e vennero incisi in modo piú fine e preciso. Nondimeno, se si prescinde dalle differenze nella lingua delle iscrizioni, nell'astrolabio tipico dell'inizio del seicento c'era ben poco o nulla che non sarebbe stato immediatamente familiare a un astronomo di un millennio prima. Lo strumento datato piú antico che ci sia pervenuto è attribuito all'anno 927-928 d.C. Questo astrolabio reca anche una firma che è difficile decifrare, ma che potrebbe essere la versione araba di un nome greco (Bastulos o Nastulos).

Prima della fine del duecento l'astrolabio planisferico era noto e usato dall'India a est fino alla Spagna islamica a ovest, e dai tropici fino alla Britannia settentrionale e alla Scandinavia. Variazioni nello stile generale della decorazione sono tipiche normalmente del paese e del periodo d'origine. Gli indicatori stellari delle reti piú antiche, ad esempio, hanno di solito la semplice forma di uno stiletto con su inciso il nome della stella. In epoca successiva i costruttori di astrolabi indopersiani avrebbero invece elaborato la rete trasformandola in un disegno complesso e altamente simmetrico di archi e di curve, che non dà certo immediatamente l'impressione di essere una carta stellare, con la sua disposizione naturale necessariamente asimmetrica. I costruttori di astrolabi del mondo orientale ageminavano spesso i loro strumenti con argento e oro. È interessante, sulla base delle loro opere firmate che ci sono pervenute, ricostruire generazioni successive della stessa famiglia. Una famiglia di strumenti poteva, ad esempio, essere stata costruita per intero in un centro come Lahore, e avere perciò forse connessioni con la corte del Gran Mogol. Gli strumenti persiani tendevano a essere estremamente decorati e a recare una grande abbondanza di fini incisioni ornamentali.

Il rovescio dell'astrolabio comprende l'alidada e altre informazioni necessarie all'osservatore. Lungo il bordo dell'esemplare qui illustrato c'è una scala graduata per la misurazione dell'altezza di un corpo celeste con l'alidada. Subito dopo, verso l'interno, ci sono i 12 segni dello zodiaco, divisi in 30 gradi ciascuno. La scala dei mesi e dei giorni all'interno della scala dello zodiaco mette in correlazione la posizione del Sole sull'eclittica con la data esatta. Questo cerchio non è concentrico con gli altri per poter tener conto del moto non uniforme del Sole lungo l'eclittica. Il disegno della parte piú interna dell'astrolabio varia molto da strumento a strumento. Qui il quadrante a sinistra in alto contiene linee orizzontali in corrispondenza delle indicazioni dei gradi; le loro distanze dal diametro orizzontale dell'astrolabio corrispondono al seno dell'altezza di un oggetto al di sopra dell'orizzonte. Il quadrante a destra in alto contiene linee per il computo diretto del tempo in ore disuguali, indipendentemente dal diritto dell'astrolabio. Queste linee vengono usate in combinazione con le graduazioni incise sull'alidada. I due quadranti in fondo contengono i « quadrati dell'ombra ». Questi potevano essere usati in combinazione con uno gnomone per ottenere la cotangente o la tangente dell'altezza di un oggetto al di sopra dell'orizzonte. Se essi fossero stati divisi in modo accurato e completo, cosa che accadeva raramente, avrebbero fornito un mezzo per la misurazione delle altezze piú preciso che non l'osservazione mediante l'alidada.

Nel mondo occidentale lo stile della rete ricorda solitamente gli stili contemporanei dell'architettura ecclesiastica. Lo stile delle iscrizioni è simile a quello dei codici manoscritti occidentali in generale ed è estremamente caratteristico del periodo in cui esse furono eseguite. Ci sono buone prove del fatto che, in tutto il mondo, molti astronomi si costruirono da sé i loro strumenti, anche se ben pochi erano i centri culturali importanti che non avevano per qualche periodo le proprie officine specializzate che fabbricavano strumenti in modo professionale. Nel Medio Evo gli strumenti europei erano firmati raramente col nome dell'artigiano che li aveva costruiti; a quell'epoca, del resto, l'anonimità non era considerata un difetto. Nel cinquecento gli astrolabi europei erano invece spesso firmati.

La maggior parte degli astrolabi hanno un diametro compreso fra 7 e 45 centimetri, ma se ne trovano anche di dimensioni molto maggiori: in questo caso essi assumono forme alquanto diverse, come i quadranti usati come orologi astronomici. L'uso dell'astrolabio come orologio risale all'antichità classica, quando alla rete veniva fatta compiere una rotazione al giorno da un meccanismo ad acqua. Dopo l'invenzione dello scappamento puramente meccanico, alla fine del duecento, orologi astronomici furono collocati nella maggior parte delle grandi cattedrali europee. Secondo la disposizio-

ne tipica, la carta stellare e la carta delle coordinate dell'astrolabio convenzionale si scambiavano di posizione: le coordinate venivano riportate sulla rete, mentre le stelle erano dipinte sul disco retrostante. Di solito le stelle venivano fatte ruotare e veniva mantenuta immobile la rete, ma talvolta i ruoli venivano rovesciati. A volte sull'eclittica della carta stellare si trova un modello del Sole; esso veniva mosso lungo l'eclittica manualmente, o a opera di un meccanismo, in modo da percorrere per intero l'eclittica nel giro di un anno. Per poter leggere l'ora su un tale orologio si deve avere familiarità almeno con i princípi fondamentali dell'uso dell'astrolabio.

Il fine principale dell'astrolabio era quello di indicare l'ora. Innanzitutto veniva determinata l'altezza del Sole o di una stella, usando l'astrolabio come strumento d'osservazione. Quindi, supponendo che l'osservatore conoscesse la posizione del Sole o della stella sulla rete, questa veniva fatta ruotare finché la punta relativa veniva a coincidere con l'almucantarat corrispondente all'altezza appropriata. (Si suppone che l'osservatore sapesse quale clima scegliere per la sua latitudine e su quale lato della linea del meridiano cadesse l'oggetto.) La rifrazione atmosferica, che altera la posizione apparente degli oggetti in cielo, e che è tanto maggiore quanto piú essi sono vicini all'orizzonte, veniva ignorata. La posizione approssimata del Sole sull'eclittica per ogni giorno dell'anno si ricava dalla scala calendariale sul rovescio dell'astrolabio.

Una volta collocata la rete nella posizione giusta, l'osservatore può trovare il suo tempo locale ricorrendo a una delle varie convenzioni esistenti. Se la circonferenza dell'astrolabio riporta una graduazione, 15 gradi corrispondono a un'ora. Sarà mezzogiorno quando il Sole si trova verso la parte alta dello strumento, mezzanotte quando si trova verso il basso, le 6 del mattino quando si trova a sinistra e le 18 quando si trova a destra. Immaginiamo ora un cerchio massimo che congiunga alcuni oggetti in cielo col polo celeste boreale. L'angolo che questo cerchio massimo fa col meridiano è l'angolo orario dell'oggetto. In conseguenza della proiezione stereografica, un regolo che si trovi a concidere con una linea che passi per il centro dell'astrolabio e per la punta rappresentante l'oggetto fa col diametro verticale (la linea del meridiano) un angolo uguale all'angolo orario dell'oggetto. L'angolo orario è chiamato cosí perché può fornire un'indicazione del tempo mediante i mutamenti che subisce in conseguenza della rotazione della Terra. Esso è citato di solito in ore, minuti e secondi, invece che in gradi d'arco.

Con l'aiuto dell'astrolabio si possono definire vari tipi di tempo. Il primo è il tempo siderale, ovvero il tempo determinato dal moto delle stelle, che è definito come l'angolo orario del primo punto dell'Ariete (o punto vernale). Se il giorno è contato da zero ore a 24, cominciando dalla mezzanotte, al computo per il tempo siderale si dovranno aggiungere 12 ore poiché all'equinozio vernale il primo punto dell'Ariete (che corrisponde in questo momento alla posizione del Sole) intersecherà il meridiano al mezzogiorno locale.

Un secondo tipo di tempo è il tempo solare vero: ossia l'angolo orario del Sole senza tener conto della sua posizione rispetto alle stelle. Esiste poi un altro tipo di tempo solare, piú familiare, il cosiddetto tempo solare medio, il quale postula un « Sole medio » che si muova lungo l'equatore (invece che sull'eclittica) con una velocità uniforme per tutta la durata dell'anno, compiendo un circuito completo in un anno esatto, come fa il Sole vero. La Terra orbita attorno al Sole percorrendo un'ellisse di cui il Sole occupa un fuoco e si muove tanto piú velocemente nella sua orbita quanto piú vicina è al Sole. Osservato dalla Terra, il Sole vero dà perciò l'impressione di percorrere l'eclittica con velocità ora maggiore e ora minore. Il Sole vero e il Sole medio si muovono perciò non solo su traiettorie diverse ma anche con diverse velocità. Per passare dal tempo solare vero osservato al piú utile tempo solare medio, si deve perciò applicare una correzione, nota come equazione del tempo. Essa si fonda sulla conoscenza del moto della Terra sulla sua orbita e può essere trovata in pubblicazioni apposite. Questo tipo di correzione fu applicato raramente prima del seicento. Al fine di convertire il tempo solare medio nel tempo locale in qualche località standard, come ad esempio Greenwich, l'osservatore deve conoscere la propria longitudine geografica; anche questo tipo di correzione venne messo in pratica assai raramente.

Un terzo tipo di tempo è quello misurato in ore diseguali. L'uomo comune, nel Medio Evo, divideva il periodo di luce diurna in 12 parti uguali e il periodo di oscurità notturna in altre 12 parti uguali, prescindendo dalla durata reale del giorno e della notte. La durata delle ore di luce è ovviamente uguale a quella delle ore di buio solo quando il Sole si trova in un equinozio. Molti dischi di astrolabio includono linee che indicano ore di diversa durata. Per evitare che queste linee venissero confuse con quelle degli almucantarat, le linee orarie venivano tracciate solo al di sotto della linea dell'orizzonte (*si veda la figura alla pagina 68*).

Nel Medio Evo il tempo veniva spesso computato a partire dal sorgere del Sole o dal tramonto, anche quando veniva misurato in ore comuni uguali. Molti dischi d'astrolabio presentano linee in apparenza simili alle linee delle ore di durata disuguale ma che di fatto servono alla misurazione del tempo in ore uguali dal sorgere del Sole o dal tramonto.

Benché l'astrolabio fosse primariamente uno strumento destinato alla determinazione del tempo, era un accessorio estremamente utile in astrologia. Per redigere un oroscopo per un tempo particolare, un astrologo aveva bisogno di conoscere il grado dell'eclittica che si trova sull'orizzonte orientale (« l'ascendente »), il grado dell'eclittica che si trova sull'orizzonte occidentale (« il discendente »), il grado dell'eclittica nel punto in cui essa interseca il meridiano (« il grado del mezzo cielo ») e il grado dell'eclittica nel punto in cui essa interseca la prosecuzione verso nord del meridiano, una volta chiamata la linea di mezzanotte (« mezzo cielo inferiore »). Questi gradi vengono letti facilmente sull'anello dell'eclittica una volta che la rete sia collocata nella posizione giusta per il momento di tempo che interessa; per esempio il momento della concezione, della nascita, della morte o di qualche altro evento importante, come un'incoronazione. Una volta trovati i quattro punti-chiave dell'oroscopo, possono essere determinate le 12 case astrologiche (che non devono essere confuse con i segni), e i pianeti possono essere assegnati a esse. Esistono ovviamente molti modi diversi di procedere alla divisione. Il lettore può vederne la descrizione nel trattato di Chaucer sull'astrolabio.

Come accade oggi per i calcolatori elettronici, l'astrolabio era nel Medio Evo una fonte di stupore e di divertimento, di tedio e di incomprensione. Per quanto possa essere stato impreciso in pratica, esso era indubbiamente utile, soprattutto nella determinazione del tempo. Benché venisse usato soprattutto nelle ore notturne, al « buio », l'espressione « i secoli bui » (*dark ages*) non pare molto appropriata per indicare l'epoca in cui esso fu cosí diffuso e cosí ben compreso.

La percezione delle figure a orientazione alterata

Molti oggetti familiari sembrano diversi quando la loro orientazione viene modificata. Sembra che ciò sia dovuto al fatto che la percezione della forma comprende l'assegnazione automatica di un «alto», di un «basso» e di «lati»

di Irvin Rock

Molte esperienze comuni della nostra vita quotidiana che consideriamo scontate pongono, in realtà, problemi scientifici di straordinario interesse. Nel campo della percezione visiva uno di tali problemi è rappresentato dal motivo per cui le cose ci appaiono diverse quando sono capovolte o inclinate. Se, per esempio, osserviamo capovolta la fotografia di un volto familiare, questo diventa difficilmente riconoscibile e, una volta riconosciuto, è difficile coglierne esattamente l'espressione.

Si consideri inoltre che cosa accade quando delle parole scritte a mano o stampate vengono capovolte. Le parole stampate possono essere lette con sforzo, ma quelle scritte a mano sono quasi impossibili da decifrare (*si veda l'illustrazione in alto a pagina 76*). Fate la prova con un saggio della vostra stessa calligrafia. Una spiegazione ovvia del perché la lettura delle parole capovolte è difficile è che noi abbiamo acquisito l'abitudine a leggere muovendo gli occhi da sinistra a destra e pertanto quando guardiamo uno scritto capovolto i nostri occhi hanno la tendenza a muoversi nella direzione sbagliata. È possibile che questo rappresenti una fonte di difficoltà, ma è improbabile che sia il fattore determinante. È altrettanto difficile leggere anche una sola parola capovolta se la guardiamo senza muovere affatto gli occhi. È probabile che lo stesso fattore che interferisce nel riconoscimento dei volti e di altre figure capovolte interferisca anche nel riconoscimento delle parole.

Anche la rotazione parziale di una figura molto semplice può impedire il riconoscimento, a condizione che l'osservatore ignori il fatto che la figura è stata ruotata. Una figura familiare orientata in modo insolito non sembra avere più la stessa forma (*si veda l'illustrazione in basso a pagina 76*). Come fece osservare Ernst Mach alla fine del diciannovesimo secolo, l'aspetto di un quadrato è assai diverso se esso è ruotato di 45 gradi. E infatti lo chiamiamo rombo.

Alcuni sosterranno che una forma familiare orientata in modo insolito ci sembra diversa per il semplice motivo che raramente la vediamo in questa posizione. Ma anche figure che non abbiamo mai visto prima ci appaiono differenti quando sono diversamente orientate (*si veda l'illustrazione in alto a pagina 77*). Il fatto è che l'orientazione incide sulla forma percepita, e che il mancato riconoscimento di una figura familiare orientata in modo insolito è basato sul cambiamento della forma percepita.

D'altra parte, una figura può essere modificata in vario modo senza che ciò abbia alcun effetto sulla percezione della forma (*si veda l'illustrazione al centro a pagina 77*). Gli psicologi, sulla base di un'analogia con fenomeni musicali simili, chiamano questi cambiamenti «trasposizioni». Una melodia può venire trasposta in un'altra chiave e, sebbene tutte le note siano differenti, essa, tuttavia, non cambia. In realtà, generalmente, noi siamo del tutto inconsapevoli dell'avvenuta trasposizione. È chiaro che la melodia è il risultato dei rapporti intercorrenti tra una nota e l'altra, e tali rapporti non cambiano quando la melodia viene trasposta. Analogamente una forma visiva si basa soprattutto sul tipo di rapporto che intercorre tra le sue parti sul piano geometrico. Per esempio, un quadrato può essere descritto come una figura avente quattro lati di eguale lunghezza, i lati opposti paralleli, e quattro angoli retti. Se il quadrato viene modificato nelle dimensioni o nella posizione tali caratteristiche non cambiano: ecco perché continua ad apparirci come un quadrato. Sono stati gli psicologi della Gestalt a mettere in evidenza l'importanza preminente dei rapporti, rispetto ai caratteri assoluti, nella percezione.

Considerato che una trasposizione basata sulla rotazione non altera i rapporti geometrici interni di una figura, perché mai essa ci appare diversa quando ne sia alterata l'orientazione? A questo punto dovremmo analizzare il significato della parola orientazione.

Quali modificazioni introduce una orientazione alterata? Ovviamente la rotazione di una figura porta a una modificazione dell'orientazione della sua immagine sulla retina dell'occhio. Pertanto sarebbe forse giusto chiederci perché orientazioni retiniche diverse della stessa figura debbano dar luogo alla percezione di figure diverse. Questo potrebbe portarci a indagare sul modo in cui il cervello elabora le informazioni sulla forma e sul perché proiezioni diversamente orientate di un'immagine retinica debbano indurre a percepire forme diverse.

Prima di procedere oltre in questa direzione è opportuno considerare un altro significato del termine orientazione. Le figure capovolte e ruotate illustrate in questo articolo sono orientate diversamente rispetto alle direzioni orizzontale e verticale dell'ambiente in cui esse sono di norma contenute. La parte della figura che normalmente è in alto in relazione alla gravità, al cielo o al soffitto, si trova ora, nella figura, in basso o di lato. Forse è proprio questo tipo di orientazione a essere responsabile dell'alterata percezione della forma quando una figura è orientata in modo insolito.

Non è difficile separare, in un esperimento, i fattori retinici da quelli ambientali. Si tagli un quadrato di carta e lo si attacchi al muro in posizione tale che la base del quadrato sia parallela alla linea del pavimento. Si confronti l'aspetto del quadrato osservato prima con la testa diritta e poi con la testa inclinata di 45 gradi. Si vedrà che il quadrato continua a sembrare un quadrato anche quando la testa è inclinata. Tuttavia, in questo caso, l'immagine retinica del quadrato è uguale all'immagine del rombo quando il rombo viene guardato con la testa diritta. Pertanto, non è l'immagine retinica a essere responsabile dell'aspetto alterato assunto da un quadrato ruotato di 45 gradi. L'esperimento inverso conduce alla stessa conclusione. Si ruoti il quadrato sul muro in modo da farlo diventare un rombo. Se lo si guarda con la testa inclinata di 45 gradi, l'immagine retinica che si forma è quella di un quadrato, ma il rombo continua a sembrare un rombo. Non c'è bisogno di dire che in questi semplici esperimenti si continua a percepire correttamente quali sono l'alto, il basso e i lati delle figure, anche se si cambia la propria postura. È chiaro, dunque, che ciò che altera la forma apparente di una figura non è il cambiamento di orientazione della sua immagine retinica, ma il cambiamento della sua orientazione percepita in rapporto all'ambiente.

Queste conclusioni sono state confermate dagli esperimenti che Walter I. Heimer e io, con altri colleghi, abbiamo effettuato con numerosi soggetti. In una serie di questi esperimenti si mostrava ai soggetti una serie di figure insolite. In una prima fase il soggetto era seduto a tavolino e si limitava a guardare diverse figure mostrate l'una dopo l'altra in rapida successione. Poi ad alcuni soggetti si chiedeva di ruotare la testa di 90 gradi appoggiandola sul tavolo. In questa posizione il soggetto guardava una serie di figure, alcune delle quali erano nuove mentre altre gli erano già state mostrate in precedenza. Queste ultime erano presentate in due diverse orientazioni diverse: o con la parte alta in direzione del soffitto della camera (come nella prima presentazione), o ruotate di 90 gradi in modo che la parte alta corrispondesse alla sommità della testa ruotata del soggetto. A questi si chiedeva di dire se la figura era stata già vista nella prima seduta, senza dirgli che l'orientazione delle figure precedentemente viste poteva essere alterata. Ad altri soggetti venivano presentate le figure test mentre si trovavano in posizione seduta con la testa eretta.

Quando abbiamo confrontato le prestazioni dei soggetti che avevano visto le figure con la testa inclinata con quelle dei soggetti che le avevano viste in posizione eretta, i risultati sono emersi con chiarezza. I soggetti con la testa inclinata riconoscevano le figure diritte rispetto all'ambiente (ma la cui immagine retinica era inclinata) altrettanto bene dei soggetti seduti. Né c'era differenza fra i due gruppi rispetto al mancato riconoscimento delle figure inclinate nell'ambiente (ma la cui immagine retinica era diritta). In altre parole gli esperimenti confermarono che è la rotazione rispetto alle coordinate alto-basso e sinistra-destra dell'ambiente a produrre il cambiamento della forma percepita. Non è la rotazione dell'immagine retinica a produrre la modificazione, dal momento che l'alterata orientazione dell'immagine non preclude il riconoscimento, e che il riconoscimento non è migliorato se l'orientazione è mantenuta inalterata.

In un altro esperimento veniva mostrata ai soggetti una figura ambigua o reversibile che poteva essere percepita in due modi diversi a seconda della sua orientazione. Per esempio, quando una figura che sembrava una carta geografica degli Stati Uniti veniva ruotata di 90 gradi, essa sembrava il profilo di un uomo con la barba. Poi si chiedeva ai soggetti di guardare di nuovo le figure ambigue con la testa appoggiata sul tavolo. La domanda che ci ponevamo era la seguente: quale sarebbe risultato l'«alto» dominante, quello dell'ambiente o quello dell'immagine retinica? I risultati furono decisivi. Circa l'80% dei soggetti riferirono di vedere solo quell'aspetto della figura ambigua che era verticale rispetto all'ambiente, anche se la figura alternativa era verticale sulla loro retina (*si veda l'illustrazione in basso a pagina 78*).

Per quale motivo l'orientazione di una figura rispetto alle coordinate di direzione dell'ambiente ha un effetto così profondo sulla percezione della sua forma? La risposta che io suggerisco è che la forma percepita si basa su un processo cognitivo in cui le caratteristiche della figura sono implicitamente descritte dal sistema percezionale. Per esempio, se dovessimo descrivere la figura colorata a sinistra della illustrazione in alto a pagina 77, diremmo che si tratta di una figura chiusa che poggia su una base orizzontale e presenta una protuberanza sul suo lato sinistro e una rientranza sul lato destro. Se dovessimo descrivere la figura colorata che si trova alla sua destra, sebbene questa sia identica e solo ruotata di 90 gradi, la descriveremmo in modo diverso: diremmo che è una figura simmetrica con due protuberanze alla base e con i lati destro e sinistro più o meno diritti e identici fra loro. Non voglio dire con questo che una descrizione del genere sia conscia o verbale; ovviamente nell'un caso e nell'altro saremmo consapevoli del processo descrittivo. Inoltre, gli animali e i bambini che non parlano percepiscono la forma più o meno come noi. La mia ipotesi è che ha luogo un processo analogo a quello descrittivo sopra illustrato, e che questo non poggia solo sulla geometria interna di una figura, ma tiene conto anche della parte inferiore, della parte alta e dei lati della figura stessa. In una descrizione di questo tipo l'orientazione costituisce pertanto un fattore di primaria importanza nel determinare la forma che verrà infine percepita.

Alcuni esperimenti da me condotti in collaborazione con Phyllis Olshansky hanno dimostrato che certi cambiamenti di orientazione hanno un effetto notevole sulla percezione della forma. In particolare sembrano particolarmente importanti in questo senso la creazione di una simmetria intorno a un asse verticale laddove prima simmetria non c'era (o viceversa), lo spostamento dell'asse longitudinale dalla verticale all'orizzontale (o viceversa), lo spostamento del «basso» di una figura da un'ampia base orizzontale a un angolo acuto (o viceversa). Cambiamenti di forma di questo tipo possono essere il risultato di cambiamenti angolari anche modesti dell'orientazione, per esempio di 45 gradi o 90 gradi. Cosa abbastanza interessante, le inversioni, o rotazioni di 180 gradi, hanno spesso un effetto solo molto scarso sulla forma percepita, forse perché esse non alterano in genere la percezione della simmetria o dell'orientazione dell'asse longitudinale della figura.

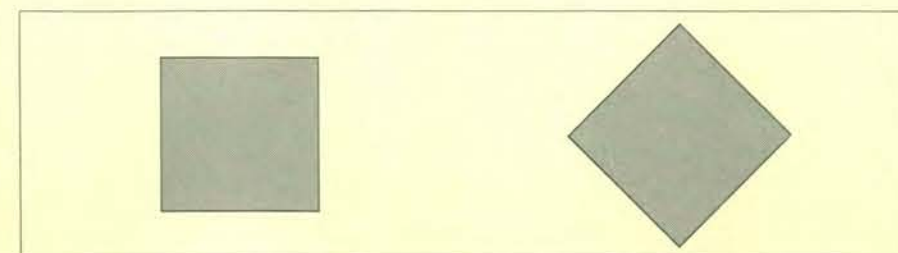
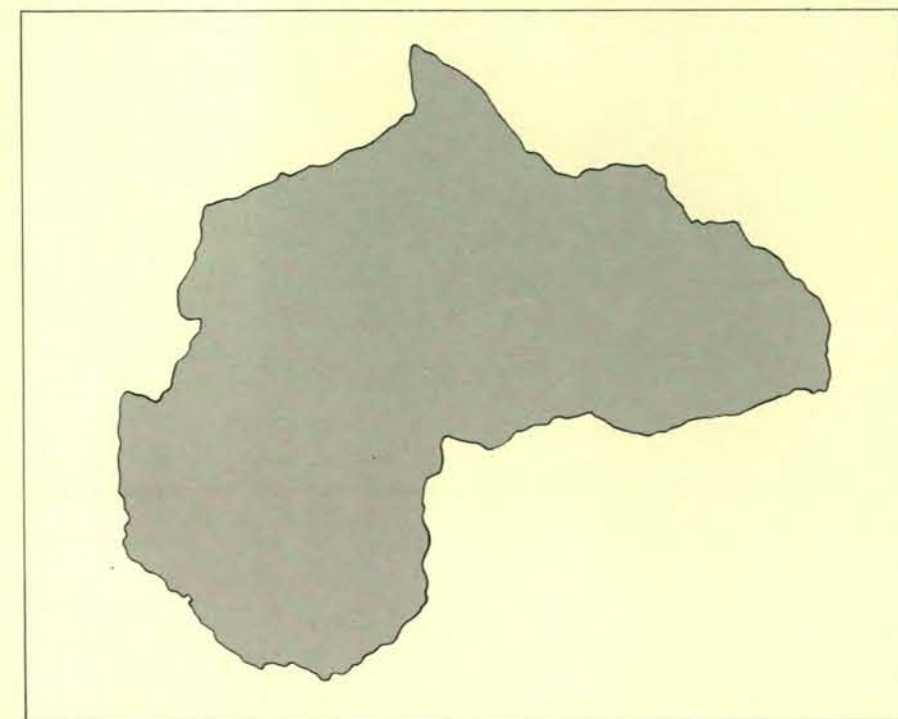
Esiste un tipo di cambiamento di orientazione che non ha praticamente nessun effetto sulla percezione della forma: l'immagine speculare. Questo è particolarmente vero per le figure insolite che abbiamo adoperato nei nostri esperimenti. Come possiamo spiegarci questo fenomeno? Sembra che a differenza dei «lati» dello spazio visuale che sono essenzialmente intercambiabili, le direzioni «alto» e «basso» dell'ambiente non lo siano. «Alto» e «basso» sono due direzioni nettamente distinte nel mondo in cui viviamo. Possiamo pertanto affermare che una figura per i nostri sensi ha tre fondamentali confini percezionali: alto, basso e lati. Di conseguenza la descrizione di una figura non sarà molto modificata dal fatto che un dato carattere si trovi a sinistra o a destra. I bambini piccoli e gli animali hanno grande difficoltà a discriminare tra una figura e la sua immagine speculare, ma distinguono

È difficile leggere un testo capovolto

È praticamente impossibile leggere la scrittura ordinaria capovolta.

La scrittura a stampa capovolta è difficile da leggere, e le parole scritte a mano sono praticamente impossibili a decifrarsi. La difficoltà si riscontra anche con la propria calligrafia, nonostante la si sia letta per tutta la vita nella normale orientazione diritta.

facilmente una figura e la sua immagine capovolta.

Collegato a questa analisi è un fenomeno osservato da Mach e sperimentato da Erich Goldmeier: una figura simmetrica rispetto a un asse apparirà in genere simmetrica solo se l'asse è verticale. Robin Leaman e io abbiamo dimostrato che a produrre questo effetto è l'asse verticale della figura così come viene percepito, e non l'asse verticale dell'immagine retinica della figura stessa. Un osservatore che tenga la testa inclinata continuerà a percepire la simmetria della figura se la figura è simmetrica rispetto all'asse verticale dell'ambiente. Questo fa ritenere che la simmetria venga percepita solo quando le due metà equivalenti di una figura sono situate sui due lati equivalenti nello spazio percezionale.

Il quadrato e il rombo sono due forme familiari. Le due figure qui illustrate sono identiche; tuttavia il loro aspetto è così diverso che una la chiamiamo quadrato e l'altra rombo. Per quanto riguarda il rombo, gli angoli, a prima vista, non sembrano retti.

L'insolita forma qui illustrata ci diventa familiare appena la giriamo di 90 gradi in senso orario. In un esperimento condotto in una classe, quando la figura rovesciata era disegnata sulla lavagna, non era riconosciuta come il profilo dell'Africa fino a quando agli alunni non veniva detto che la figura era ruotata rispetto alla posizione normale.

Se, come abbiamo ipotizzato, la descrizione di una figura è basata sulla collocazione dei suoi alto, basso e lati, sorge il quesito: come vengono assegnate queste direzioni in una figura? Si potrebbe supporre che la parte alta di una figura sia di norma quella che si dimostra tale in relazione al soffitto, al cielo o alla parte alta di una pagina. In una camera buia un soggetto può fare affidamento sul suo senso di gravità per individuare quale sia l'alto.

Numerosi esperimenti effettuati dagli psicologi hanno dimostrato che le fonti principali di informazione per percepire l'orizzontale e il verticale sono in realtà due: la gravità e le informazioni tratte dalla scena stessa. Abbiamo potuto dimostrare che entrambi questi fattori possono influire sulla percezione della forma di una figura. Una figura luminosa in una stanza buia non verrà riconosciuta con facità se è stata ruotata e orientata diversamente, anche se la testa dell'osservatore viene ruotata in misura eguale. In questo caso la sola fonte di informazione sulle direzioni nello spazio è rappresentata dalla gravità. In una stanza illuminata l'osservatore avrà spesso difficoltà a riconoscere una figura se sia lui sia la figura sono in posizione diritta ma è stata ruotata la stanza. La stanza inclinata influisce in modo molto efficace sulla localizzazione dell'asse verticale, e questo porta a un'errata attribuzione dell'alto e del basso della figura.

A volte basta informare l'osservatore del fatto che la figura è stata ruotata perché egli riesca a percepire la figura correttamente. Questo può spiegare perché alcuni lettori non considereranno strane o diverse alcune delle figure ruotate qui illustrate. La situazione inversa, cioè il dare informazioni sbagliate all'osservatore sulla posizione delle figure, produce risultati impressionanti. Se si dice a un soggetto che la figura che sta per vedere ha il vertice in una posizione che non corrisponde all'alto dell'ambiente, egli con tutta probabilità non riconoscerà la figura anche se gli viene presentata nella stessa posizione in cui l'aveva vista la prima volta. La figura non ha un'orientazione alterata e l'osservatore assegna in modo sbagliato « alto », « basso » e « lati » sulla base delle istruzioni ricevute.

Poiché questa conoscenza sull'orientazione permette all'osservatore di modificare le direzioni da lui assegnate a una figura, e poiché è proprio questa assegnazione a determinare la percezione della forma, è assolutamente necessario impiegare, negli esperimenti sulla percezione basati sull'orientazione, soggetti del tutto ignari. In altre parole, il soggetto non deve sapere che l'esperimento riguarda l'orientazione delle figure, affinché egli non le esamini con l'intento di individuare quelli che erano l'alto, il basso e i lati quando le aveva osservate prima. Vi sono tuttavia delle figure che sembrano possedere un'orientazione intrinseca indipendentemente dal modo in cui vengono presentate: una determinata regione viene più facilmente percepita come « alto » (*si veda l'illustrazione in alto a pagina 78*). È pertanto difficile o impossibile ostacolare il riconoscimento di tali figure alterandone l'orientazione.

In assenza di altri indizi un soggetto assegnerà le coordinate alto-basso in base al proprio soggettivo o egocentrico sistema di riferimento. Si consideri una figura disegnata su un foglio circolare di carta poggiato sul pavimento. Né la gravità né indizi visivi indicano quali siano rispettivamente l'alto e il basso. Tuttavia l'osservatore assegnerà l'alto a quella parte della figura che si trova in alto rispetto al proprio egoistico sistema di riferimento di coordinate. L'asse verticale della figura viene visto allineato con l'asse longitudinale testa-corpo dell'osservatore. La direzione « alto » corrisponde alla posizione della sua testa. Noi abbiamo potuto dimostrare che una tale attribuzione di direzione ha lo stesso effetto sul riconoscimento di quello che hanno altre basi di attribuzione della direzione. Una figura vista la prima volta in una data orientazione sul foglio circolare non verrà in genere riconosciuta se la sua egocentrica orientazione viene alterata.

Veniamo ora a un'osservazione che sembra essere in contrasto con gran parte di ciò che è stato detto finora. Se una persona legge a letto giacendo su un fianco, non tiene il libro diritto, rispetto all'ambiente, ma inclinato. Se il libro non viene tenuto inclinato l'immagine retinica è orientata in modo anomalo e la lettura risulta difficile. Analogamente, se un lettore guarda con la testa capovolta del materiale stampato, o fotografie o volti che sono diritti rispetto all'ambiente, avrà la stessa difficoltà a riconoscerli di quella che incontra quando tiene la testa diritta e sono capovolte le figure. Un osserva-

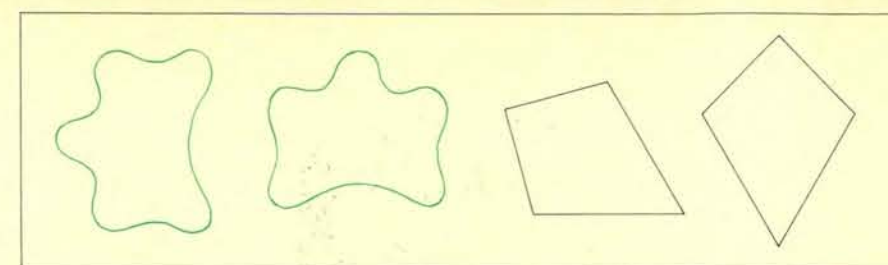
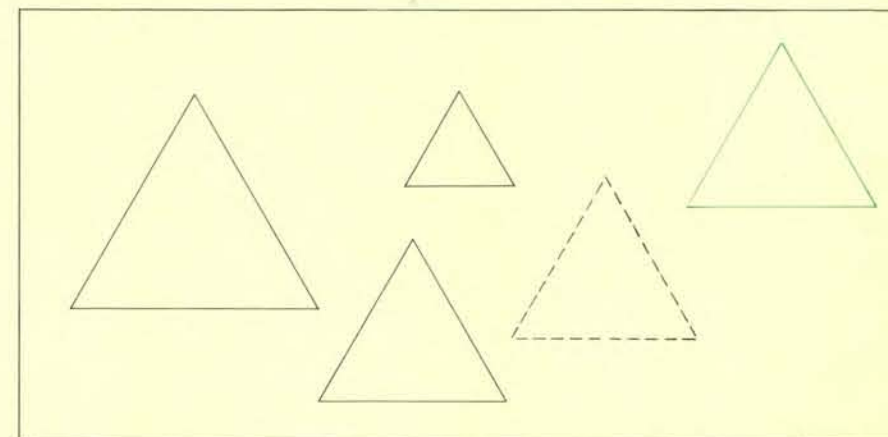
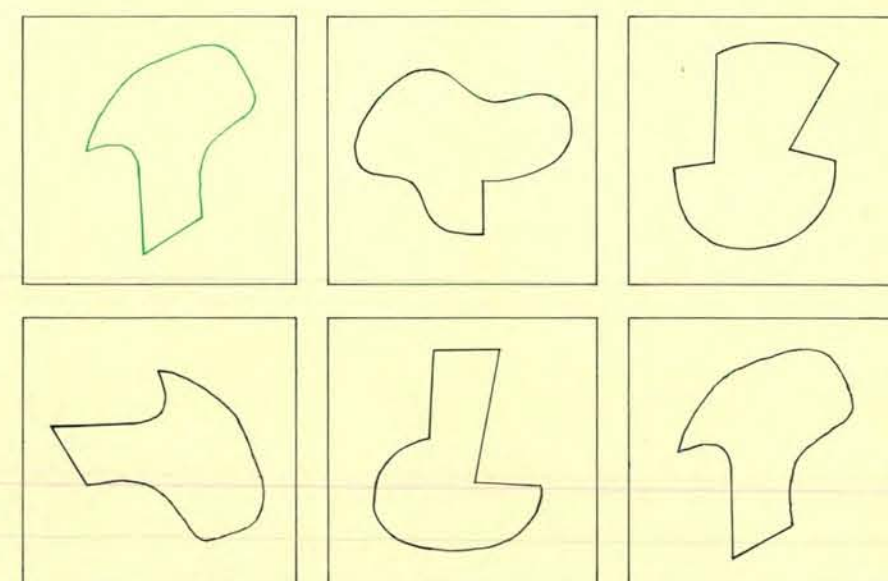



Figure nuove o insolite sembrano differenti a seconda del loro orientamento purché le si guardi semplicemente e non le si ruoti mentalmente. La ragione potrebbe consistere nel modo in cui una figura viene « descritta » dal sistema percezionale. La figura colorata a sinistra potrebbe essere descritta come una forma chiusa appoggiata su una base orizzontale con una protuberanza a sinistra e una rientranza a destra. La figura colorata adiacente a essa, benché identica, potrebbe essere descritta come una forma simmetrica appoggiata su una base curva con una sporgenza in alto. La prima figura in nero potrebbe essere descritta come un quadrilatero appoggiato su un lato. Quella a destra potrebbe essere descritta come una forma romboidale poggiata su un vertice.

L'alterazione nella grandezza, colore o tipo di contorno non modifica la percezione della forma di un triangolo. Anche variando la sede dell'immagine retinica (guardando con la coda dell'occhio o fissando punti diversi) la forma percepita non cambia.

La rotazione dell'immagine retinica, ottenuta piegando la testa di 90 gradi, non modifica in misura apprezzabile la capacità di riconoscere una figura insolita (*in colore*). A dei soggetti seduti veniva presentata dapprima una serie di figure-bersaglio, e poi una serie di figure test (*in nero*), e si chiedeva loro di identificare le figure già viste prima. Alla seconda presentazione alcuni soggetti tenevano la testa inclinata di 90 gradi; altri la testa diritta. I soggetti, che avevano tenuto la testa ruotata di 90 gradi, trovavano difficoltà nel riconoscere figure « diritte » sulla retina (ad esempio quella in basso a sinistra), tanto quanto i soggetti che avevano tenuto la testa diritta (per i quali tali figure non erano « diritte » sulla retina). Il primo gruppo di soggetti, dunque, riconosceva le figure diritte rispetto all'ambiente (*a destra, in basso*) tanto quanto il secondo.

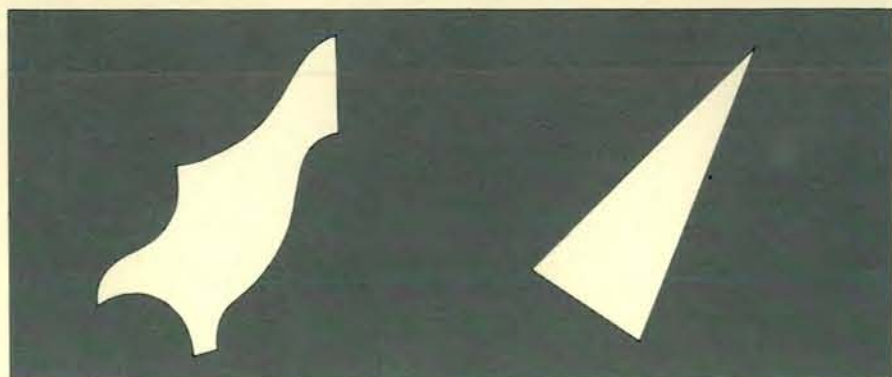
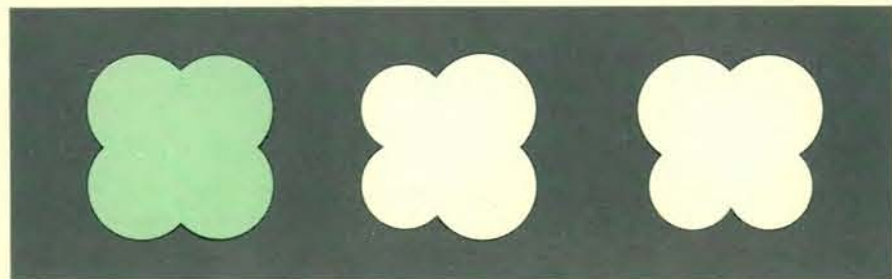
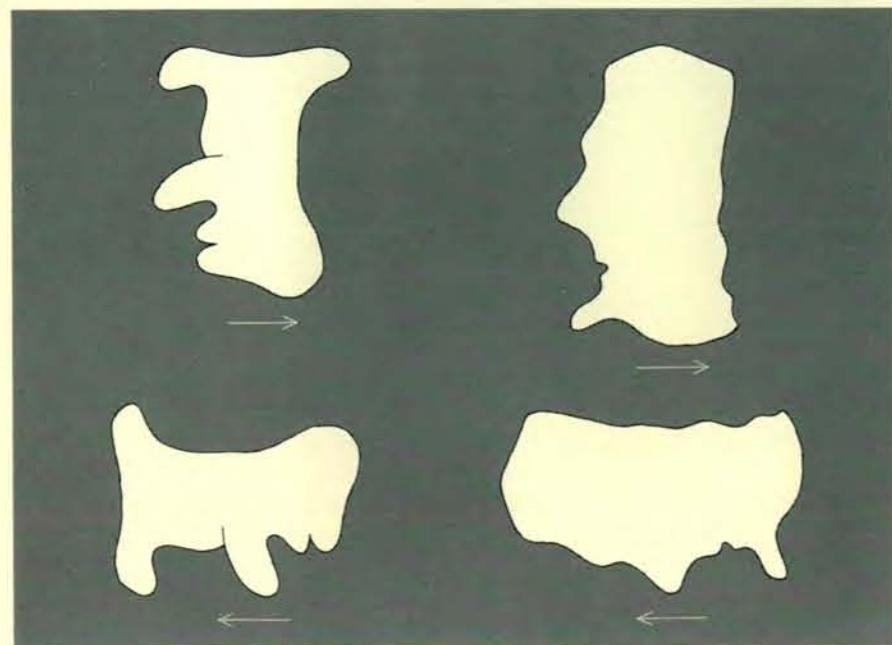



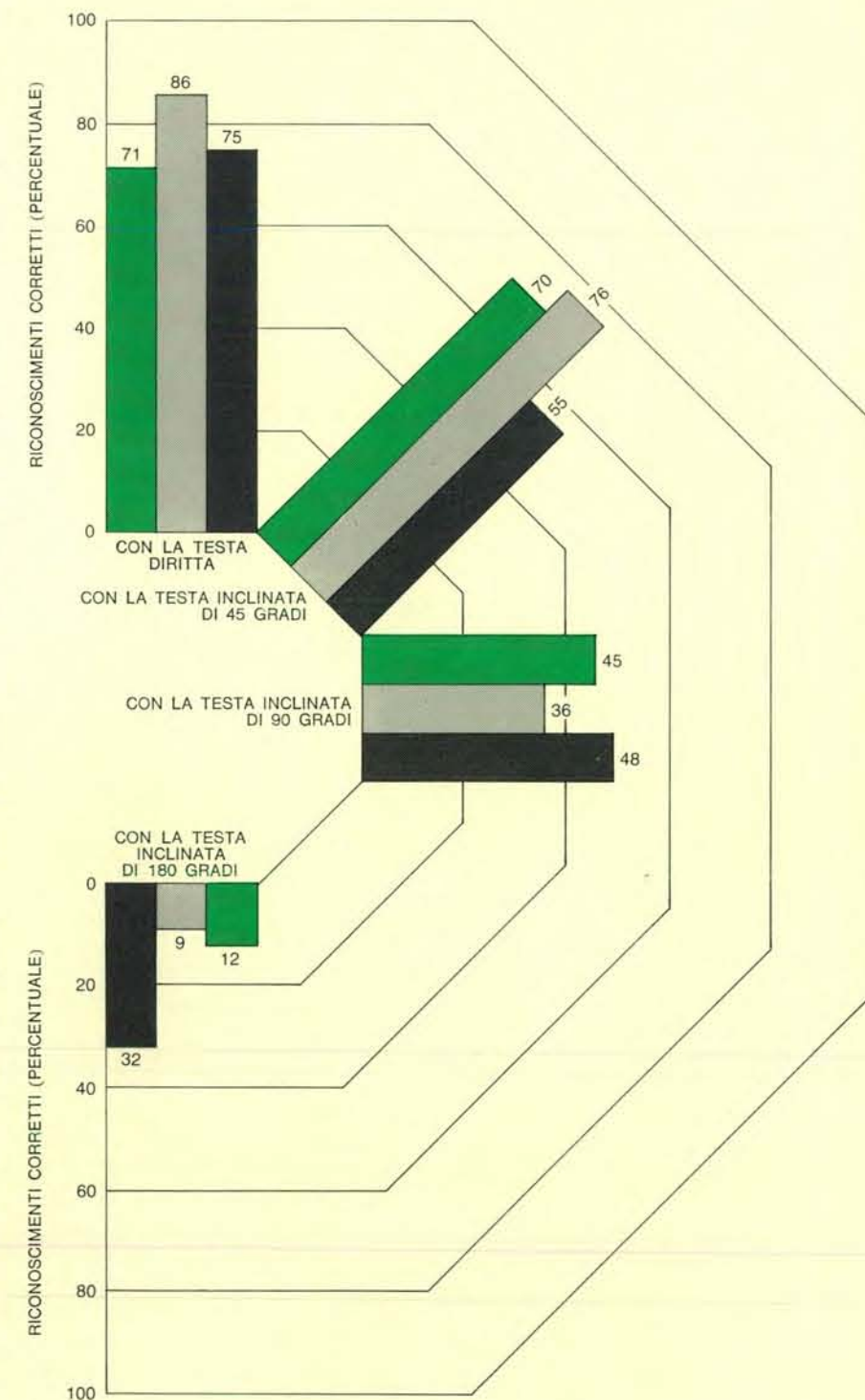
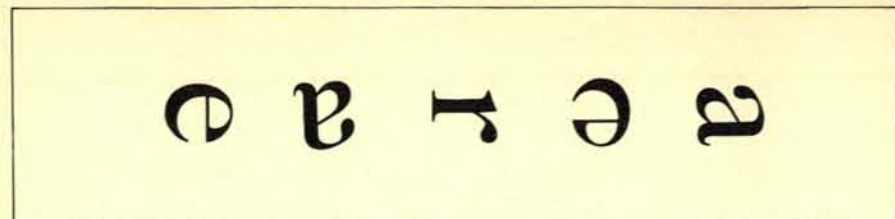
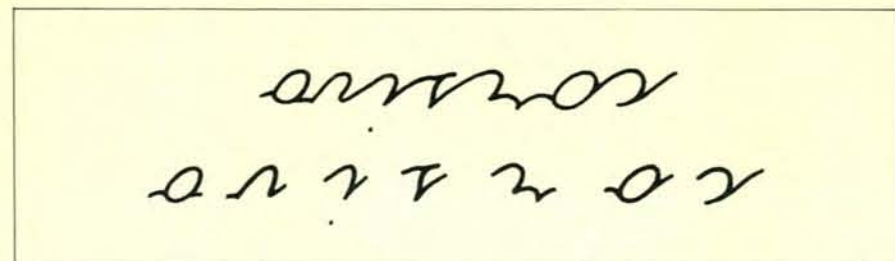
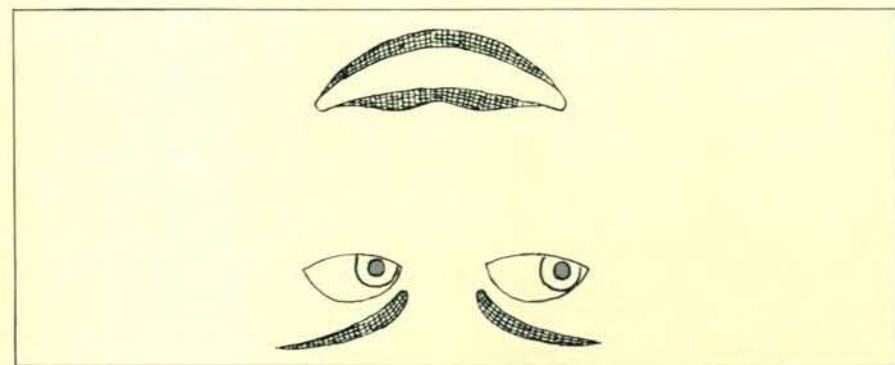
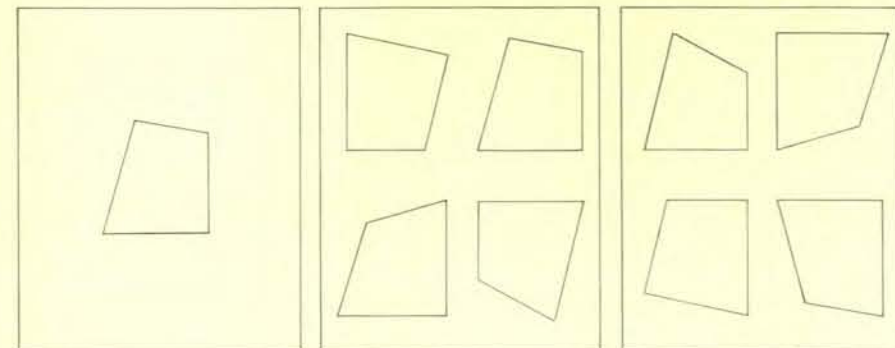
Figure con orientazione intrinseca sembrano avere un asse verticale naturale indipendentemente dalla loro orientazione fisica. Un'estremità dell'asse è percepita come « alto ».

L'impressione di simmetria è spontanea soltanto quando una figura è simmetrica rispetto a un asse verticale. Ad alcuni soggetti è stato chiesto di indicare quale delle due figure (*al centro e a destra*) era più simile alla figura-bersaglio (*a sinistra*). La figura a destra veniva indicata con maggiore frequenza, forse perché è simmetrica rispetto all'asse verticale. Se la pagina venisse ruotata di 90 gradi, la figura al centro sarebbe indicata come la più simile alla figura-bersaglio. Se invece la pagina fosse in posizione verticale e le figure fossero osservate con la testa ruotata di 90 gradi, la figura a destra verrebbe di nuovo indicata come la più somigliante. Sembra, quindi, che a determinare la percezione della simmetria non sia la simmetria rispetto all'asse verticale egocentrico sulla retina, ma quella rispetto all'asse ambientale della figura.

Le figure ambigue possono essere percepite in modi differenti a seconda della loro orientazione. La figura a sinistra in alto può sembrare il profilo della testa di un uomo con un cappello da cuoco, oppure, se ruotata di 90 gradi, un cane (*in basso, a sinistra*). La figura a destra in alto può sembrare il profilo di un uomo con la barba, oppure il profilo degli Stati Uniti d'America (*in basso, a destra*). Quando alcuni soggetti osservavano queste figure ambigue con la testa ruotata di 90 gradi (la posizione della testa dei soggetti è indicata dalla freccia), essi generalmente riconoscevano le figure che erano diritte rispetto all'ambiente piuttosto che quelle che erano diritte sulla retina.

tore che tenga la testa capovolta, tuttavia, continuerà a percepire che le figure sono diritte. Inversamente, se le figure sono capovolte rispetto all'ambiente e l'osservatore le guarda con la testa all'ingiù non avrà alcuna difficoltà a riconoscerle. E tuttavia l'osservatore continuerà a percepire che le figure sono capovolte. In questi casi, dunque, è l'orientazione dell'immagine retinica, non l'attribuzione della direzione nell'ambiente, che sembra responsabile del fatto che le figure vengano o meno riconosciute.

Gli esperimenti eseguiti da Robert Thouless, G. Kanizsa e G. Tampieri con figure ambigue confermano che l'orientazione retinica ha un suo ruolo nel riconoscimento di una figura (*si veda l'illustrazione a pagina 81*). Inoltre, come è stato dimostrato da George Steinfeld e da me, il riconoscimento delle parole e dei volti diritti diminuisce in proporzione diretta al grado di inclinazione del corpo (*si veda l'illustrazione della pagina a fianco*). Con questo particolare materiale di studio il riconoscimento risulta essere una funzione inversa del grado di inclinazione dell'immagine retinica. Come abbiamo visto, la relazione tra grado di inclinazione e riconoscibilità non è valida nei casi in cui l'attribuzione della direzione è stata alterata. In tali casi l'effetto massimo non si ha con un cambiamento di 180 gradi ma con uno di 45 o 90 gradi. I risultati di tutti questi esperimenti ci hanno portato a concludere che due fattori distinti sono implicati nella percezione delle figure a orientazione alterata: un fattore è rappresentato dall'attribuzione della direzione, l'altro è retinico. Io credo che quando guardiamo una figura tenendo la testa inclinata noi compensiamo automaticamente l'inclinazione, cosí come compensiamo le dimensioni degli oggetti lontani. Un oggetto che si trovi a una moderata distanza da noi non ci sembra piccolo, nonostante la sua immagine retinica sia molto piú piccola di quanto non sia quando l'oggetto è vicino. In genere tale effetto viene spiegato ammettendo che l'immagine retinica venga in qualche modo corretta tenendo conto della distanza che ci separa dall'oggetto. Analogamente, se un osservatore che tiene la testa inclinata guarda in una stanza buia una linea verticale luminosa, questa continuerà ad apparirgli verticale o quasi verticale nonostante il fatto che l'immagine retinica nell'occhio dell'osservatore sia inclinata. Pertanto l'inclinazione del corpo deve essere in qualche modo considerata dal sistema percezionale. L'immagine retinica inclinata viene dunque corretta, col risultato che la linea è percepita come verticale. Cosí come la correzione della dimensione a distanza viene chiamata costanza di dimensione, cosí la correzione della verticale può essere chiamata costanza di orientazione.

Quando guardiamo una figura diritta tenendo la testa inclinata senza aver effettuato nessuna correzione, la prima informazione che riceviamo è quella di un'immagine della figura in una particolare orientazione retinica. Per prima cosa, probabilmente, il sistema percezionale elabora l'immagine retinica in base all'attribuzione egocentrica di un alto, di un basso e di lati, forse sulla base di un primitivo senso di orientamento originato dall'orientazione retinica. Per esempio, quando guardiamo un quadrato diritto tenendo la testa inclinata, e si forma quindi sulla nostra retina l'immagine di un rombo, è possibile che noi percepiamo per un attimo un rombo prima che la correzione divenga operante. L'orientazione della testa viene quindi automaticamente presa in considerazione allo scopo di correggere la percezione. Pertanto la vera parte alta del quadrato viene vista come uno dei lati del quadrato, anziché un angolo. La figura viene quindi correttamente « descritta » come avente i lati orizzontali e verticali rispetto all'ambiente, in breve come un « quadrato ». Questa correzione viene effettuata rapidamente e in genere senza sforzo. Per poter descrivere una figura l'osservatore deve probabilmente visualizzarla o immaginarla secondo il suo reale « alto », « basso » e « lati », anziché secondo alto, basso e lati della sua immagine retinica.

Se la figura è relativamente semplice, la correzione non risulta difficile. Se guardiamo una lettera diritta con la testa inclinata, la riconosciamo facilmente; è interessante, tuttavia, che ci sia ancora qualcosa di strano in questo. Io ritengo che la responsabilità di questa stranezza vada attribuita al duplice aspetto della percezione dell'orientazione. Esiste una percezione non corretta della lettera basata sulla sua orientazione egocentrico-retinica, e una sua percezione corretta che è basata sulla sua orientazione nell'ambiente. La prima percezione produce una forma inconsueta che spiega la curiosa apparenza della lettera nonostante il suo successivo riconoscimento. Nei nostri esperimenti molte delle figure di cui ci siamo serviti erano, strutturalmente parlando, equivalenti a lettere, e in alcuni casi abbiamo usato addirittura lettere di alfabeti sconosciuti.

Con una figura piú complessa, come una parola capovolta o una parola diritta guardata da un osservatore con la testa all'ingiú, il meccanismo di correzione può risultare del tutto inadeguato. Ogni lettera della parola deve essere corretta separatamente, e il meccanismo correttivo, a quanto pare, non è in grado di effettuare una correzione multipla e contemporanea. È vero che se si lascia tempo sufficiente a disposizione anche una parola capovolta può essere decifrata, ma tuttavia essa non apparirà mai la stessa di quando è diritta. Mentre una lettera viene corretta, le altre continuano a essere percepite nel loro aspetto inconsueto. E c'è una ulteriore difficoltà:

Il riconoscimento di certi tipi di materiale visivo diminuisce quasi in proporzione diretta al grado di inclinazione della testa dell'osservatore. In una serie di esperimenti sono stati registrati gli esatti riconoscimenti di volti (*strisce in colore*), di parole scritte (*in grigio*) e di figure frammentate (*in nero*) in rapporto a vari gradi di inclinazione della testa. Il soggetto osservò diversi campioni di ciascun tipo di materiale test in ognuna delle varie posizioni della testa. Per questo materiale visivo il riconoscimento è una funzione inversa del grado di disorientazione dell'immagine sulla retina.

Una singola lettera rovesciata può essere facilmente identificata una volta che si sia compreso come sia orientata. Continua, tuttavia, ad apparire strana, poiché la percezione che deriva dall'immagine retinica non corretta coesiste con l'immagine corretta.

La scrittura ordinaria capovolta è difficile da decifrare perché molte lettere rovesciate ne ricordano altre scritte correttamente. Ad esempio una *u* rovesciata sembrerà una *n*, e una *c* rovesciata sembrerà una *s*. Inoltre la connessione fra le lettere rende incerti sull'inizio e la fine di ogni lettera. Diverse unità capovolte possono essere raggruppate insieme e percepite a torto come se fossero una lettera diritta. Se le diverse lettere rovesciate vengono separate l'una dall'altra, la loro decifrazione diventa molto più facile.

I lineamenti rovesciati del volto sono difficili da interpretare poiché, mentre ci si concentra per correggere un lineamento, gli altri rimangono intatti. Ad esempio uno potrebbe riuscire a correggere gli occhi qui illustrati in modo tale che essi siano percepiti come rivolti verso il basso e a sinistra, ma nello stesso tempo la bocca resta nella sua posizione ed esprime tristezza piuttosto che gioia. Viceversa uno potrebbe riuscire a correggere la bocca e non percepire però l'esatta direzione dello sguardo.

Si è trovato che elementi multipli rappresentano una difficoltà per il riconoscimento di figure anche semplici. Dei soggetti osservarono in posizione diritta la figura-bersaglio (*a sinistra*). Dopo venivano loro mostrate brevemente delle figure test alcune contenenti la figura-bersaglio (*al centro*) e alcune no (*a destra*). I soggetti dovevano indicare quando vedevano una figura identica a quella « bersaglio ». Metà dei soggetti guardarono le figure test con la testa in posizione diritta, e metà con la testa capovolta. La prestazione del secondo gruppo fu modesta. In altri esperimenti con una singola figura test, la posizione della testa non modificava apprezzabilmente il riconoscimento.

l'ordine delle lettere è fondamentale per il riconoscimento della parola, e il rovesciamento di una parola inverte il normale ordine sinistra-destra.

Il riconoscimento delle parole scritte a mano e capovolte è ancora più difficile. In questi casi molte delle singole « unità » rassomigliano notevolmente a lettere normali in posizione diritta. Inoltre, poiché le lettere sono unite tra loro, è difficile stabilire dove finisce una lettera e ne comincia un'altra. Se le lettere delle parole capovolte vengono separate, il riconoscimento diviene più semplice. Anche così, è sempre troppo facile confondere una *u* e una *n*. Questo tipo di confusione è possibile anche con certe lettere stampate, come *b* e *q*, *d* e *p*, *n* e *u*, sia pure non così di frequente. In altre parole, se una figura viene riconosciuta in base alla sua orientazione egocentrico-retinica, questo può instaurare la tendenza a stabilizzare la percezione e a bloccare il processo correttivo.

È possibile che anche il guardare una faccia capovolta imponga al meccanismo correttivo un compito troppo arduo. Forse la faccia contiene un certo numero di tratti ciascuno dei quali deve essere appropriatamente percepito perché l'insieme venga riconosciuto (si veda l'articolo *Il riconoscimento dei volti* di Leon D. Harmon, in « Le Scienze », n. 66, febbraio 1974). Mentre l'attenzione è concentrata sulla correzione di un tratto, per esempio la bocca, altri tratti rimangono non corretti e continuano a essere percepiti in base all'immagine cui danno vita sulla retina. Naturalmente nel riconoscimento di una faccia sono importanti anche i rapporti che intercorrono tra i diversi tratti, ma anche in questo caso questi rapporti sono numerosi e possono imporre al meccanismo correttivo un compito troppo arduo.

Charles C. Bebber, Douglas Blewett e io abbiamo effettuato un esperimento per vagliare l'ipotesi che sia la presenza di componenti multiple a creare la difficoltà di correggere le figure. Si mostrava per breve tempo a dei soggetti una figura quadrangolare e si diceva loro di esaminarla. Essi guardavano la figura tenendo la testa diritta. Poi veniva loro mostrata una serie di carte test ciascuna delle quali conteneva quattro figure quadrangolari. Queste venivano guardate per un secondo e si chiedeva ai soggetti di indicare se la figura prima osservata era presente sulla carta.

I soggetti capivano di dover rispondere affermativamente solo nel caso che avessero visto una figura identica a quella osservata in precedenza sia per la forma sia per l'orientazione. (Alcune delle figure test erano simili alle precedenti ma ruotate di 180 gradi.) Metà delle carte test veniva guardata con la testa diritta e metà con la testa all'ingiù. Si presumeva, in questa posizione, che il soggetto non sarebbe stato capace di correggere tutte e quattro le figure test nel breve tempo concessogli. Il numero di unità che egli doveva percepire tenendo la testa diritta era identico, ma non aveva nessuna correzione da fare. La nostra previsione era che spesso le figure non sarebbero state riconosciute e che i soggetti, nel guardare le carte test con la testa all'ingiù, avrebbero riconosciuto per errore delle figure sbagliate.

I risultati andarono oltre le nostre aspettative. Quando si devono correggere delle componenti multiple, una orientazione alterata sulla retina esercita un effetto negativo sul riconoscimento. L'osservatore rispondeva correttamente, quando teneva la testa diritta, al doppio delle carte test di quando teneva la testa all'ingiù.

Come ho già detto, se guardiamo figure difficilmente riconoscibili quando la loro orientazione sulla retina è alterata, la difficoltà aumenta nella misura in cui aumenta il grado dell'inclinazione. Il perché di questo fatto può esser posto anch'esso in rapporto con la natura del processo di correzione. Io ho fatto l'ipotesi che il soggetto debba sopprimere la direzione com'è percepita (egocentricamente) dalla retina e sostituirla con una percezione corretta. Per far questo, tuttavia, egli deve visualizzare o immaginare come la figura apparirebbe se fosse ruotata fino a trovarsi in posizione diritta rispetto a lui, oppure, il che è lo stesso, come apparirebbe se si ruotasse lui fino a trovarsi in posizione diritta rispetto alla figura. Il processo della rotazione mentale richiede la visualizzazione dell'intera sequenza di cambiamenti angolari e, perciò, quanto più grande è l'angolo della rotazione, tanto maggiore la difficoltà.

Le facce ambigue sono percepite differentemente quando le loro immagini sulla retina dell'osservatore sono capovolte. Se tenete l'illustrazione in posizione verticale e la osservate tra le gambe con la testa rovesciata, le altre facce saranno percepite anche se rovesciate rispetto all'ambiente. Lo stesso effetto si ottiene quando si capovolge l'illustrazione e si osserva in posizione diritta. Simili test provano che figure, come le facce, sono riconosciute in base alla loro orientazione sulla retina.

Come sanno benissimo tutti i genitori, i bambini dai due ai cinque anni sembrano del tutto indifferenti alla orientazione data a una figura. Spesso essi tengono un libro sottosopra e non sembrano per nulla disturbati dalla cosa. Sulla base di queste osservazioni e dei risultati di alcuni esperimenti di parecchio tempo fa, molti psicologi hanno concluso che l'orientazione di una figura non è un fattore indispensabile al riconoscimento di essa da parte dei bambini piccoli. Esperimenti condotti più di recente in laboratorio, tuttavia, non confermano il fatto che i bambini riconoscono le figure comunque orientate. Quando vengono loro mostrate per la seconda volta delle figure già viste in precedenza con una diversa orientazione, essi hanno altrettanta difficoltà a riconoscerle quanta ne hanno gli adulti, se non di più. Per qual motivo, allora, i bambini spesso guardano spontaneamente le figure capovolte nelle situazioni di tutti i giorni? Forse essi non hanno ancora imparato a fare attenzione all'orientazione, e non si rendono conto del fatto che se lo facessero il riconoscimento sarebbe più facile. Quando i bambini, dopo i sei anni, imparano a leggere, essi sono costretti a concentrare la loro attenzione sull'orientazione perché certe lettere differiscono solo per questo aspetto.

Riassumendo, il fatto fondamentale di cui siamo venuti a conoscenza, a proposito dell'orientazione, è che la forma di una figura non è percepita semplicemente in funzione della sua geometria interna. La forma percepita è anche, e in larga misura, una funzione dell'« alto », « basso » e « lati » che noi attribuiamo alla figura stessa. Se c'è un cambiamento nelle direzioni attribuite, la figura assumerà una diversa forma percezionale. Io suggerisco l'ipotesi che il cambiamento della forma percepita si basa su una nuova « descrizione » della figura da parte del sistema percezionale. Le direzioni attribuite si basano su informazioni di vario tipo sulla localizzazione dell'alto, basso e lati della figura e in genere non dipendono dall'orientazione sulla retina dell'immagine della figura stessa. Quando l'immagine non è diritta sulla retina, si rende necessario un processo di correzione per arrivare a una descrizione corretta, e questa correzione è difficile o impossibile da realizzare quando il materiale visuale è costituito da componenti multiple.

Tutto questo implica che la percezione della forma in generale poggia sui processi cognitivi in misura molto maggiore di quanto non sostengano tutte le teorie correnti. Un punto di vista ampiamente diffuso tra gli psicologi e i fisiologi degli organi di senso ammette che la percezione della forma possa essere ridotta alla percezione dei contorni, e che la percezione dei contorni, a sua volta, possa essere ridotta a certe repentine differenze di intensità della luce che fanno partire un impulso in determinate unità nervose della retina e del cervello. Se questo fosse vero, la percezione della forma sarebbe il risultato di una specifica concatenazione di contorni percepiti. Sebbene il lavoro da noi illustrato non escluda la possibile importanza dell'identificazione dei contorni come base della percezione della forma, esso suggerisce tuttavia che una spiegazione del genere è ben lungi dall'essere esauriente, e che la percezione della forma dipende da alcuni processi mentali come la descrizione e la correzione.

La fisica delle corde di violino

Cosa accade quando si suona con l'archetto una corda di violino? I moderni concetti circuitali e un nuovo metodo elettromagnetico di osservazione hanno ridestato un certo interesse su questo tema

di John C. Schelleng

Il punto nevralgico del violino o di qualsiasi altro strumento della stessa famiglia, il centro vitale di ogni impulso acustico, che costituisce la vita stessa della musica, è la corda suonata con l'archetto. La corda – il suo comportamento sotto l'azione delle dita e dell'arco, la sua piacevole risposta e i problemi stessi che il suonatore è chiamato a risolvere – ha una funzione di primaria importanza nel definire l'identità musicale di questa famiglia di strumenti. Concettualmente, una corda è l'elemento piú semplice, nonostante la sua manifattura richieda una meticolosa cura; deve essere flessibile, uniforme e robusta. Nonostante questa semplicità il suo comportamento sotto l'azione dell'arco presenta molti interrogativi tuttora insoluti. La fisica elementare del suo comportamento può tuttavia essere di estrema importanza per il suonatore.

Tra i molti articoli pubblicati da Hermann von Helmholtz, che vanno dalla fisiologia, all'anatomia, alla fisica, alle belle arti, ce n'è uno dedicato al comportamento delle corde di violino (*On the Action of the Strings of a Violin*) pubblicato negli atti della Glasgow Philosophical Society nel 1860. Fino a quel momento si sapeva molto poco su ciò che accade in pratica quando si suona una corda di violino. Il procedimento di Helmholtz costituisce un buon esempio di come si possa chiarire un problema, a quel tempo apparentemente insolubile, con un esperimento ben congegnato e con l'ausilio della matematica. Oggi la sua apparecchiatura sarebbe chiamata oscilloscopio; per lui si trattava di un « microscopio a vibrazioni ». Attraverso siffatto strumento egli osservò un grano di amido fissato a una corda nera posta in vibrazione mediante l'archetto. Il microscopio era montato su un grosso diapason in modo da vibrare lentamente parallelamente alla lunghezza della corda. Quando sia la corda sia il diapason venivano posti in moto a frequenza opportuna, Helmholtz poté osservare una « figura di Lissajous », un oscillogramma che visualizzava la posizione del frammento di amido durante il periodo di vibrazione del diapason. Esaminando con lo stesso metodo il moto di altri punti egli ottenne sperimentalmente gli elementi necessari per una descrizione matematica del moto della corda nel suo complesso.

Helmholtz scrisse che « durante gran parte di ogni vibrazione la corda viene trascinata dall'arco. Poi, improvvisamente, essa si stacca e rimbalza, quindi viene ricatturata da altre parti dell'arco e di nuovo trascinata ». Si ha in altri termini un processo di « adesione e scivolamento » cioè la corda aderisce all'archetto per un certo tempo e poi scivola indietro. Rappresentando graficamente la posizione del frammento di amido in funzione del tempo, egli scoprí che qualsiasi fenomeno da lui scoperto poteva essere rappresentato da linee rette tranne uno. In un periodo di vibrazione, indipendentemente dal punto della corda osservato e dal punto su cui agisce l'archetto, la curva era fatta a zig-zag (*si veda la figura in questa pagina*). I due periodi di tempo della vibrazione stavano sempre nello stesso rapporto dei due tratti in cui veniva divisa la corda dal punto di osservazione.

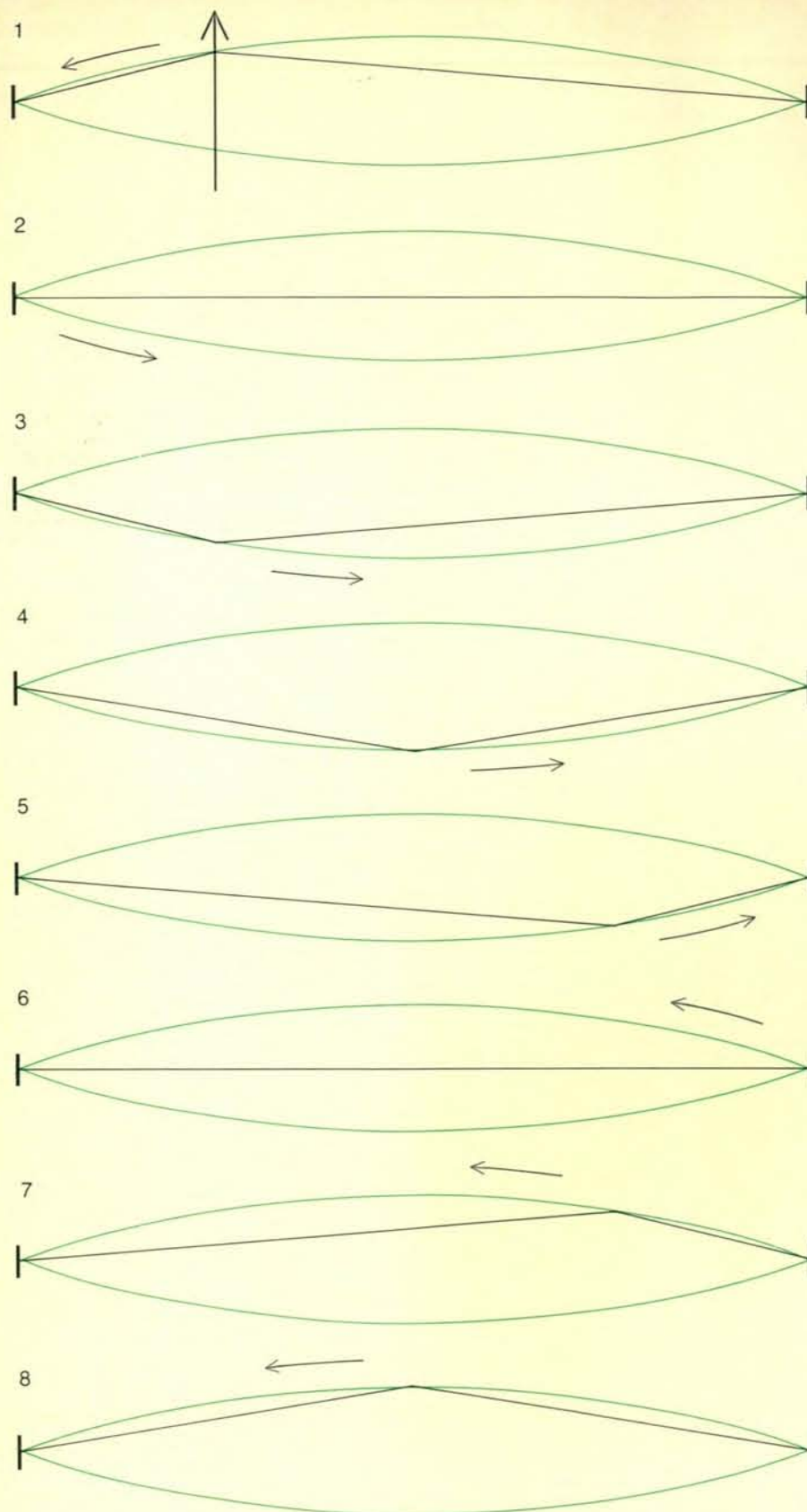
Si può imparare qualcosa osservando semplicemente la corda piú bassa di uno strumento mentre viene vigorosamente suonata con l'arco (*si veda la figura a pagina 84*). Apparentemente la corda si allarga in un nastro cui fanno da profilo da un'estremità all'altra due curve regolari. (In effetti la posizione attorno alla quale vibra la corda viene lievemente spostata verso una delle estremità dalla forza media esercitata dall'arco nella sua direzione di moto.) Helmholtz scoprí matematicamente che i profili sono delle parabole; a causa della loro piccola curvatura, esse sono però indistinguibili da archi di cerchio. Sarebbe tuttavia errato supporre che la corda abbia questa forma in qualsiasi istante: Helmholtz trovò che la corda, in un istante qualsiasi, ha la stessa forma che avrebbe se venisse spostata lateralmente dal dito in qualche punto dell'arco di cerchio; essa ha una forma rettilinea bruscamente piegata in un punto. Il punto angoloso si sposta da un bordo all'altro del profilo apparente una sola volta in ogni vibrazione; per la corda « a vuoto » *la* di un violino, per esempio, ciò si verifica 440 volte in un secondo. Se Helmholtz fosse stato in grado di osservare la corda con uno stroboscopio, il profilo sarebbe scomparso ed egli avrebbe visto la corda come una linea retta bruscamente piegata. Quando l'arco si sposta dallo « spingere » verso il « tirare », il moto si trasforma da antiorario in orario.

La velocità laterale della corda in un punto qualsiasi ha due valori che si alternano, di diverso modulo e di segno opposto. Il risultato è che una tipica curva di spostamento a zig-zag presenta una corrispondente curva di velocità di forma rettangolare. Il rapporto tra le due velocità che si alternano coincide con quello dei due tratti in cui viene divisa la corda dal punto di osservazione.

Le corde sollecitate dall'archetto sono caratterizzate da due semplici aspetti fisici. Il primo è che l'attrito « radente » è minore dell'attrito « statico » e che il passaggio dall'uno all'altro è quasi discontinuamente brusco. Il secondo è che una corda flessibile in tensione può vibrare in modi diversi, cioè tutta insieme o dividendosi in parti di uguale lunghezza, divise da punti che non vibrano e che si chiamano « nodi ». Ne consegue che la durata di una singola vibrazione nel primo modo, o modo fondamentale, coincide quasi esattamente con la durata di due vibrazioni nel secondo modo, di tre nel terzo, e cosí via. Senza perturbazioni esterne, quindi, una corda è, per sua stessa natura, capace di sostenere un'onda « periodica », cioè una serie ripetuta di vibrazioni dello stesso tipo, la cui forma d'onda è quella caratteristica del processo « adesione-scivolamento ». Sulla corda possono coesistere una moltitudine di armoniche a seconda delle caratteristiche dell'attrito.

La discontinuità oscillatoria di Helmholtz è l'orologio che determina esattamente gli istanti di cattura e di rilascio della corda da parte dell'arco. Vi è una chiara spiegazione in base alla quale la corda viene vista come una molla sospinta lateralmente in modo periodico fino al limite massimo dell'attrito statico. La molla allora scatta indietro finché viene nuovamente catturata. Questo punto di vista non può però spiegare il motivo per cui la frequenza di ripetizione si mantiene costante nell'ampio intervallo delle forze, o « pressioni », applicate dalla mano all'archetto. La spiegazione corretta deve essere data in

Il monocordo, un semplice dispositivo sperimentale usato dall'autore per studiare il moto di una corda sollecitata da un archetto, è costituito da una sola corda conduttrice di elettricità, montata tra due ponti massicci fissati su una base. Il moto della corda prodotto da un campo magnetico generato da un magnetino mobile produce un segnale di uscita che può essere amplificato e visualizzato sullo schermo di un oscilloscopio (*si veda lo schema in basso*). Con i due interruttori nella posizione superiore il sistema visualizza la velocità della corda, mentre con i due interruttori in basso, il sistema visualizza lo spostamento della corda. L'archetto può essere mosso a mano, o comandato da un pendolo o costituito da un arco rotante.

Lo spostamento di una corda sollecitata con l'archetto dalla sua posizione media viene rappresentato in funzione del tempo nella prima delle tre curve di questa figura. Le curve caratteristiche a zig-zag sono state ottenute suonando la corda nei pressi di una estremità e osservandola al centro (*a*), nei pressi del ponte (*b*) e nei pressi del capotasto (*c*). In tutti i casi i due periodi di tempo in cui si spezza la vibrazione stanno nello stesso rapporto dei due tratti in cui viene divisa la corda dal punto di osservazione. La curva rettangolare relativa alla velocità della corda (*d*) corrisponde alla curva (*c*).

La forma di una corda sollecitata con l'archetto si apre in un nastro cui fanno da profilo da un'estremità all'altra due curve regolari paraboliche (*linee in colore*). Come scoprí Hermann von Helmholtz, la forma effettiva della corda è tuttavia in qualsiasi istante quella di una retta bruscamente piegata in un punto (*linea in nero*). Il punto angoloso percorre il profilo curvilineo una sola volta in ogni vibrazione. Il suo senso di rotazione in questa particolare serie di diagrammi corrisponde a un moto dell'arco verso l'alto; invertendo il senso di moto dell'arco si inverte il senso di rotazione del punto angoloso. Questo moto caratteristico è un caso di onda stazionaria.

termini dinamici: una siffatta spiegazione viene suggerita dalla constatazione che l'intervallo di tempo necessario perché la perturbazione percorra due volte la lunghezza della corda flessibile è costante. La periodicità viene chiaramente messa in evidenza colpendo con un bastone un lungo filo da biancheria, teso, in prossimità di un suo estremo. Si vede chiaramente una discontinuità muoversi verso l'estremità piú lontana sulla quale viene riflessa. Al suo ritorno si sente attraverso il bastone (sempre appoggiato al filo) un impulso molto simile alla forza di attrito momentanea agente sulla corda. Un semplice esperimento conferma la validità di questa interpretazione del comportamento di una corda suonata con l'archetto (*si veda la figura nella pagina a fronte*).

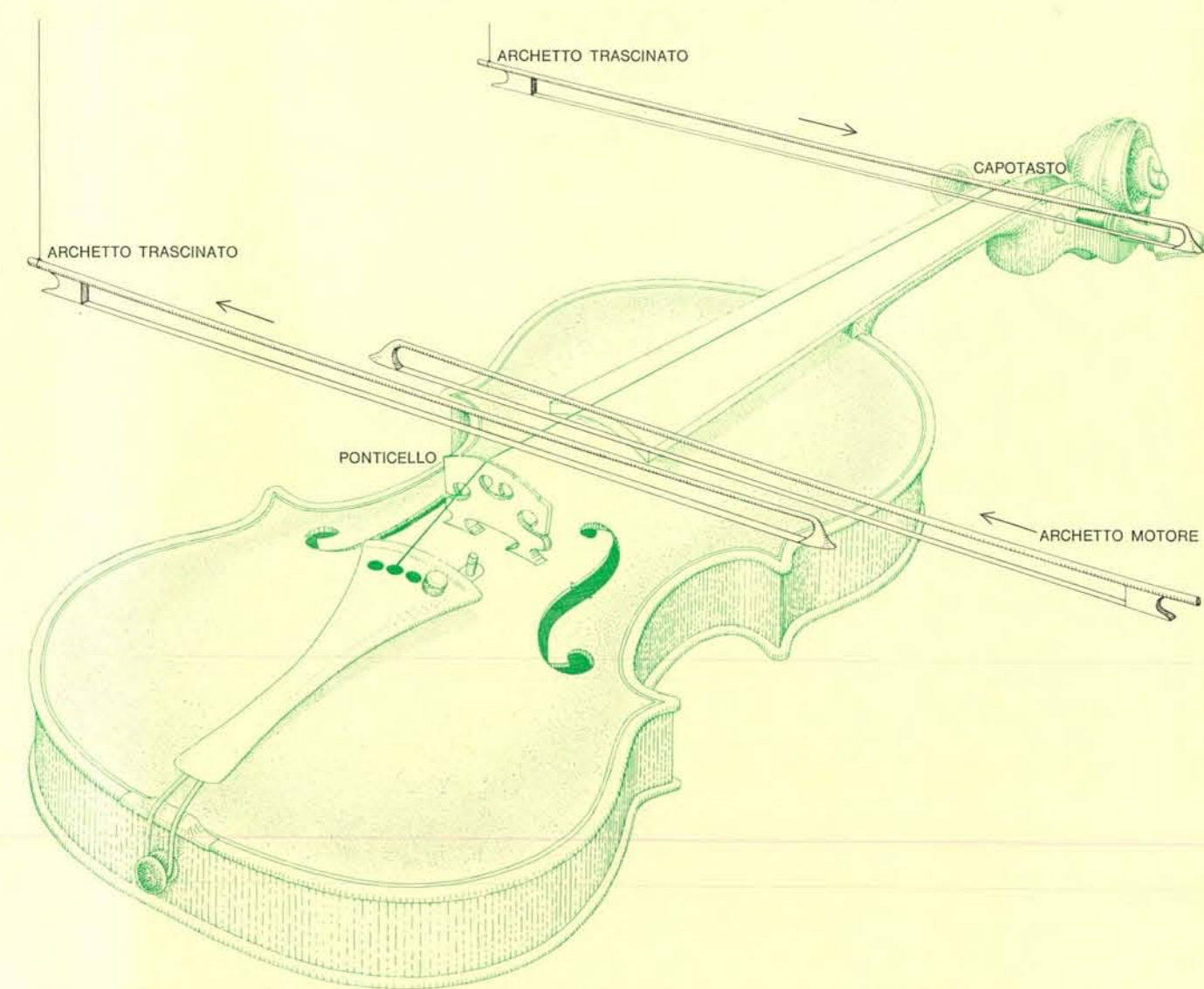
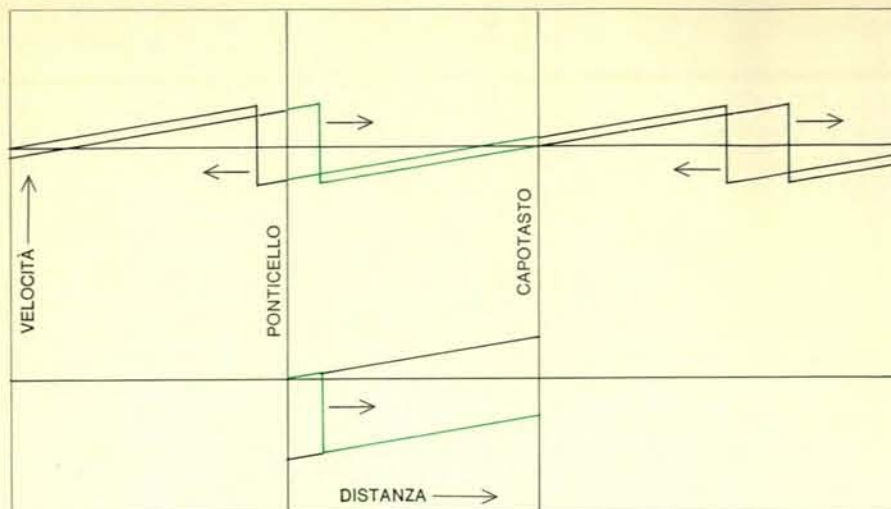
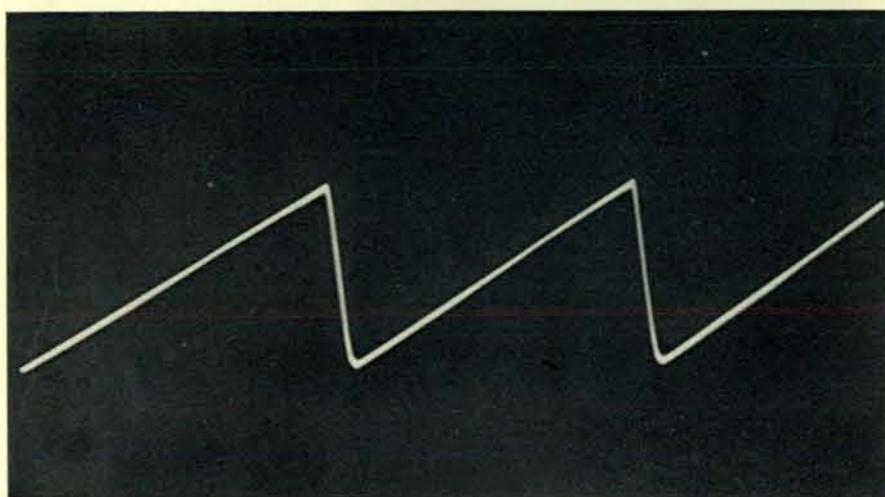
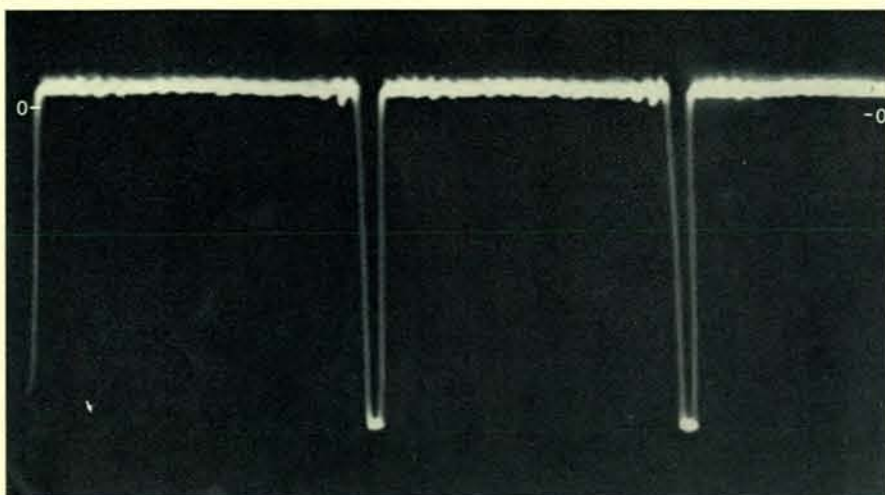
Helmholtz riteneva che la velocità di una corda durante lo scatto indietro fosse costante. Mezzo secolo piú tardi C.V. Raman scoprí che nella maggior parte dei casi questo è vero solo approssimativamente. La scoperta di Raman ebbe luogo durante un ingegnoso studio del comportamento meccanico del violino relativo sia agli esperimenti sia alla teoria. Il suo punto di partenza per quanto riguarda la corda suonata con l'archetto era di descrivere il moto in funzione delle onde progressive di velocità trasversale che inducono le onde stazionarie del sistema di Helmholtz. La stessa onda può essere descritta in funzione del suo spostamento laterale o della sua velocità laterale. Uno dei vantaggi introdotti dal considerare la velocità è costituito dal fatto che queste onde possono essere rappresentate come linee rette.

La forma dell'onda Raman nei casi che interessano la musica (Raman ne trattò molti altri tipi che non la riguardano) è ancora a zig-zag, ma differisce dalle curve di spostamento citate sopra nel senso che, mentre gli «zig» sono lenti, gli «zag» sono istantanei (*si veda la figura a pagina 86 in alto*). Quando una tale onda viene riflessa dall'estremità fissa della corda, essa appare esattamente come prima con l'eccezione che la sua direzione di propagazione è opposta. Quando la vibrazione avviene nel modo fondamentale, la lunghezza della corda è pari alla metà della distanza tra gli zag.

Negli ultimi anni, stimolato dai concetti circuitali e da un metodo elettromagnetico di osservazione del moto di una corda, si è risvegliato un certo interesse per la fisica delle corde suonate con l'archetto sia negli Stati Uniti che in Europa. Piú della metà delle corde comunemente usate negli strumenti a corda sono elettricamente conduttrici. Se viene posto vicino alla corda un piccolo magnete, la presenza di un conduttore mobile in un campo magnetico costituisce un sistema a induzione elettromagnetica, il cui segnale di uscita può essere visualizzato semplicemente inserendo la corda nel circuito di entrata di un opportuno amplificatore collegato a un oscilloscopio. La forza elettromotrice è proporzionale alla velocità della corda. La corda può essere montata sullo strumento in esame o su un *monocordo*, che è un semplice dispositivo costituito da due ponti pesanti su una base fissa muniti di un sistema per tendere la corda e di un sostegno per il magnete (*si veda la figura a pagina 82*). Nel mio esperimento furono usati due metodi di sollecitazione con l'archetto oltre a quello manuale; un arco rotante progettato da F.A. Saunders nelle sue ricerche sul comportamento dei violini e delle corde e un normale arco comandato da un pendolo da 50 libbre.

Un circuito elettrico collegato al monocordo (o allo strumento) permette di visualizzare la velocità o lo spostamento della corda sotto forma di oscillogrammi. Il primo oscillogramma nella figura in basso della pagina seguente mostra, per esempio, la velocità in corrispondenza dell'arco in una corda molto flessibile. Nel periodo lungo la velocità sta al di sopra della linea di zero che corrisponde alla velocità dell'arco (se si trascurano le lievi oscillazioni secondarie). Nel breve periodo di scivolamento vi è un'alta velocità negativa quando la corda scatta all'indietro per aderire poi nuovamente all'arco. In questo esperimento l'arco si trova vicino al ponticello e la forma della curva è simile a quella prevista dalla costruzione di Helmholtz. Lo zig-zag del secondo oscillogramma mostra la stessa vibrazione in funzione dello spostamento anziché della velocità.

La semplicità della strumentazione non è il solo vantaggio nel visualizzare la velocità anziché lo spostamento. In questo modo si possono evidenziare chiaramente dettagli ad alta frequenza a prima vista inimmaginabili.

Quando il circuito è realizzato in modo da indicare lo spostamento in prossimità del ponticello, esso indica anche la forza vibrazionale trasversale esercitata dalla corda. Il «suono della corda» da solo, depurato dagli effetti alteranti della cassa dello strumento, può essere prodotto mettendo un ma-

L'esperimento dell'«archetto trascinato», realizzato durante le ricerche dell'autore, conferma parzialmente il quadro dinamico di Helmholtz sul comportamento di una corda sollecitata da un arco. Un arco leggero, sospeso per il suo estremo piú pesante mediante un lungo filo, si appoggia su una delle corde in prossimità del ponticello, con lo strumento disposto orizzontalmente. Un secondo arco fa vibrare decisamente la corda. In questo caso l'archetto sospeso si muove (dopo un breve periodo di scivolamento) nella stessa direzione dell'archetto motore. La direzione nella quale si muove l'archetto sospeso indica la direzione di moto della corda durante l'intervallo piú lungo di ogni vibrazione. Quando l'archetto sospeso viene sistemato vicino all'estremità opposta della corda (capotasto), l'archetto trascinato si muove in direzione opposta a quella dell'archetto motore.

Le onde di Raman furono introdotte da C. V. Raman per descrivere il moto di una corda suonata con l'archetto. La forma di una siffatta onda progressiva di velocità trasversale differisce dalla corrispondente onda stazionaria di Helmholtz relativa allo spostamento della corda nel senso che gli « zig » sono lenti, mentre gli « zag » sono istantanei. Quando si compongono le onde di Raman di verso opposto (*in alto*), l'onda risultante (*in basso*) mostra che le due velocità esistenti alternativamente in qualsiasi punto della corda dipendono dalla posizione della discontinuità tra « scivolamento » e « adesione ».

Il moto di una corda molto flessibile sull'arco è rappresentato in questi due oscillogrammi, i quali mostrano la velocità della corda (*in alto*), e lo spostamento della corda (*in basso*) per la stessa vibrazione. L'arco in questo caso era disposto a una distanza dal ponticello pari a circa un ventesimo della lunghezza totale della corda. In questo esperimento la forma delle curve è simile a quella prevista dalla costruzione di Helmholtz.

gnete per ciascuna delle corde in prossimità del ponticello. L'uscita dai quattro magneti in serie attraversa l'integratore e viene quindi amplificata e registrata; questa disposizione somma le forze esercitate da tutte le corde. La riproduzione del suono registrato fornisce quindi l'effetto delle sole corde. (La registrazione non è necessaria se si usa un violino muto che non irradi alcun suono.)

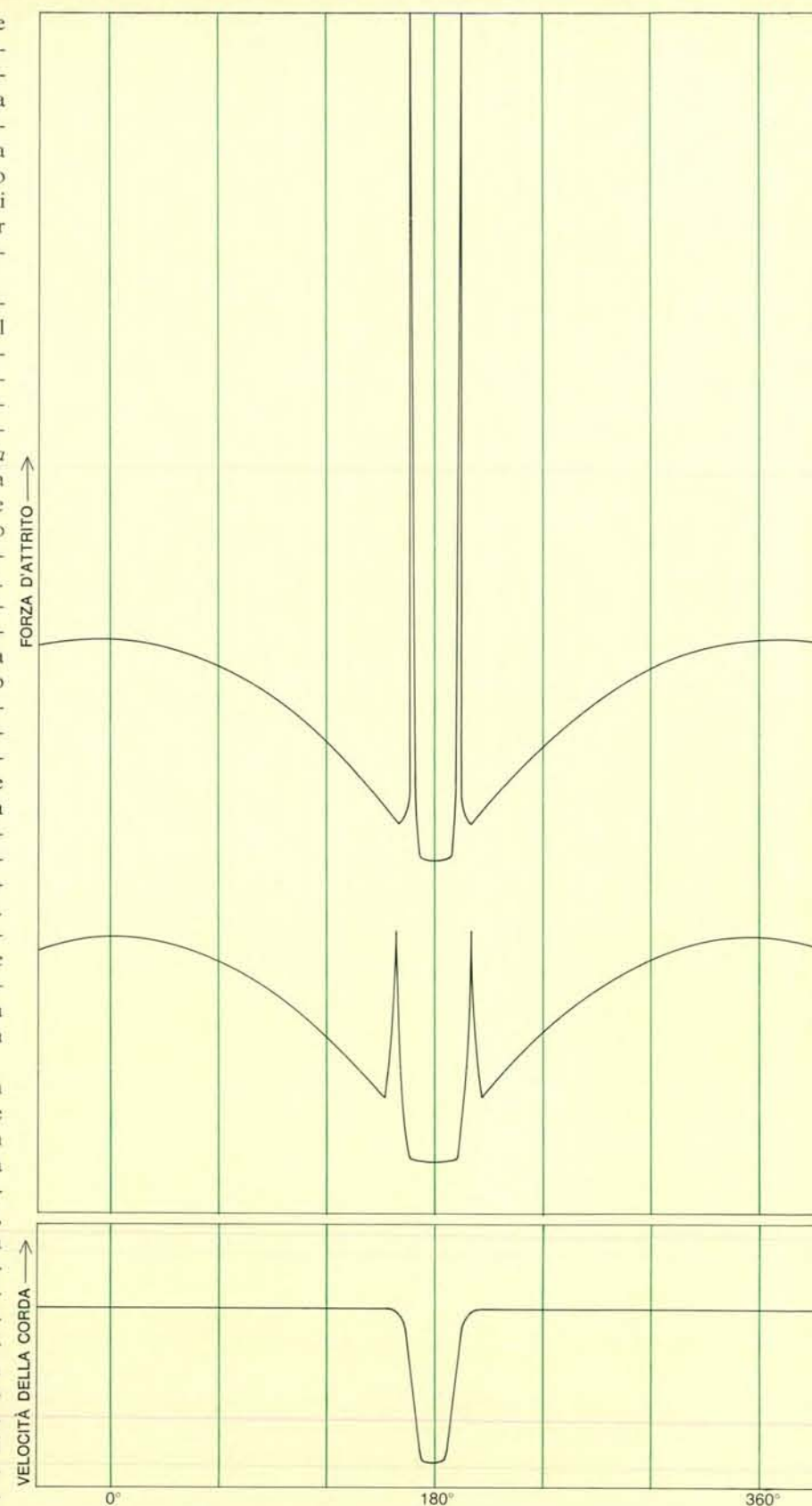
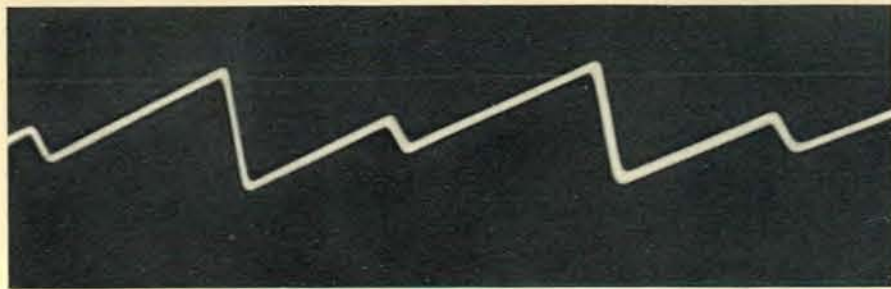
Il risultato in definitiva rassomiglia a uno strumento a corde suonate con l'archetto, ma di classe inferiore. Se il sistema trasduce fedelmente la forza esercitata sul ponticello in pressione sonora irradiata, lo spettro sonoro risultante con una data velocità dell'arco varierà con la frequenza in modo inversamente proporzionale, nel senso che l'effetto piú intenso si ha in corrispondenza alla nota piú bassa.

Nel suonare con l'archetto uno strumento a corde, esistono dei limiti alla velocità dell'arco, alla sua distanza dal ponticello e alla forza perpendicolare applicata; questi limiti non devono essere superati in una generica situazione musicale. Per un suonatore esperto si tratta solitamente di scegliere quasi senza rendersene conto tra comuni schemi di azione, ma nei casi piú critici egli è probabilmente ben consapevole dei limiti impostigli. Per fortuna questi parametri meccanici possono variare ampiamente: la distanza tra arco e ponte, per esempio, può variare da un valore minimo a cinque volte tale valore; la velocità e la forza possono arrivare fino a 100 volte il loro valore minimo. Data una coppia qualsiasi di questi parametri, per poter ottenere una nota accettabile il terzo deve cadere all'interno di un intervallo che dipende dalle costanti fisiche della corda e della cassa dello strumento. Per note sostenute questi intervalli sono ampi, anche se ovviamente non sono egualmente desiderabili tutte le zone di un dato intervallo. Per esempio, date posizione e velocità, la piú alta forza ammissibile può essere comunemente 10 volte il valore minimo. La prima domanda è: quali sono i processi che determinano l'esistenza di questi limiti?

Per poter spiegare i limiti della forza esercitata dall'arco è utile tener presente che la forza di attrito nel punto di contatto tra arco e corda varia nel tempo. Sebbene non sia al momento attuale possibile visualizzare questa forza con un oscilloscopio, è possibile presentare un quadro qualitativo semplificato della base fisica che riguarda l'argomento. Per far ciò si suppone: 1) che si possano applicare le leggi elementari dell'attrito statico e dinamico; 2) che il ponticello si comporti come un'alta « resistenza » meccanica (analoga alla « resistenza » di un circuito elettrico); 3) che siano noti la massa, la tensione e il moto della corda sull'arco. Assimilando un'onda completa al percorso di un mobile su un cerchio si possono sostituire ai tempi gli archi da 0 a 360 gradi e successivamente per la seconda oscillazione da 360, 720 gradi e cosí via.

Supponendo che la forza agente sulla corda abbia sempre la direzione del moto dell'arco, i punti di massima forza dell'arco si hanno nei momenti corrispondenti a zero, 360, 720 gradi e così via; i punti di minimo cadranno quindi a 180, 450, 900 gradi e cosí via (*si veda la figura a destra*). L'oscillazione ciclica della forza tra questi due livelli è ciò che si richiede per mettere in vibrazione lo strumento. Nel piccolo intervallo attorno a 180 gradi si ha scivolamento. Nelle transizioni da adesione a scivolamento vi è un istante in cui si esercita la massima forza d'attrito richiesta dalla forza d'arco. Le ricerche hanno mostrato che in realtà l'« attrito statico » non è del tutto statico: la velocità, anche se piccola, è finita e l'attrito in pratica cambia continuamente con la velocità nei pressi della velocità nulla con uno stretto massimo corrispondente all'attrito statico. Molto probabilmente si ha la stessa curva nel passaggio dallo scivolamento all'adesione. Il risultato sono le curve dette a « orecchie di coniglio » tipiche di tali forze di attrito. Tali curve differiscono sensibilmente nei dettagli nel passare da una nota all'altra a causa della complessità dell'azione della cassa.

Si consideri la situazione in cui la forza d'arco ha un valore tipicamente intermedio. Dal valore a zero gradi in poi, con la corda aderente all'arco, la forza cala verso il minimo, che è determinato dall'attrito dinamico. Poi, nel momento in cui l'adesione sembra del tutto sicura, interviene la discontinuità e supera l'attrito statico. La discontinuità deve solo fornire la differenza tra l'attrito statico e quello dinamico; essa è in grado di dare un contributo maggiore di quello qui richiesto, forse molto maggiore. Tuttavia, al crescere della forza d'arco, si raggiunge il momento in cui la discontinuità fallisce in questa prova di intensità e la vibrazione diventa una oscillazione irregolare. In tale istante si è superato il massimo valore ammissibile per la forza d'arco.

Quando la forza d'arco diminuisce fino a un minimo si ha un diverso tipo di insuccesso. In questo caso le « orecchie » della curva della forza di attrito cadono allo stesso livello della forza

« Le orecchie di coniglio » caratterizzano la forma delle curve che rappresentano la forza di attrito esercitata da un arco per mettere in vibrazione una corda. Un'orecchia si forma sulla curva della forza d'attrito quando la discontinuità arriva dal capotasto, supera l'attrito statico e comincia lo scivolamento; l'altra orecchia si forma quando la discontinuità ritorna dal ponticello e comincia l'adesione. La curva superiore rappresenta la forza d'attrito quando la pressione dell'arco ha un caratteristico valore a metà strada tra i limiti superiore e inferiore consentiti; la curva centrale si applica al caso del limite inferiore. Per chiarezza sono state omesse le piccolissime oscillazioni secondarie dei lembi laterali di entrambe le curve (*a sinistra e a destra*). La curva in basso è la curva di velocità della corda corrispondente alla curva della forza d'attrito riportata in alto.

Un nuovo zig-zag comincia a formarsi nella curva oscillografica dello spostamento di una corda quando la forza dell'archetto è lasciata cadere al di sotto del minimo valore. Nel caso che questa condizione instabile venga lasciata libera di svilupparsi, la nota fondamentale scompare per essere sostituita ben presto dalla armonica dell'ottava superiore.

massima al valore zero gradi, e con la piú piccola diminuzione addizionale l'attrito statico (come indicato dalle «orecchie») diventa insufficiente a tenere la corda vicino al livello a zero gradi. Il risultato è una curva di spostamento della corda instabile nella quale comincia a formarsi un nuovo zig-zag (*si veda la figura in alto in questa pagina*). Se si lascia crescere questo nuovo zig-zag la nota fondamentale verrà sostituita dalla nota di ottava; in altre parole non si riesce a ottenere la minima forza d'arco.

Nel meccanismo del suonare è rilevante il fatto che la massima forza d'arco, che dipende principalmente dalla corda e dai coefficienti di attrito, è inversamente proporzionale alla prima potenza della distanza tra l'arco e il ponticello, mentre la minima forza d'arco, che dipende anche dalla cassa dello strumento, è (almeno approssimativamente) inversamente proporzionale al quadrato di tale distanza. Le grandezze necessarie per il calcolo di questi limiti sono note sufficientemente per spiegare come la corda reagisca alle forze d'arco. Per note alte con una data velocità d'arco si possono visualizzare su un diagramma logaritmico gli andamenti rettilinei della massima e

La regione normale nella quale si suona uno strumento musicale a corde sollecitate da archetto viene indicata in questo grafico per note tenute con una velocità d'arco costante; sono riportati gli andamenti logaritmicamente rettilinei della massima e minima forza d'arco in funzione della distanza tra l'arco e il ponticello espressa come frazione della lunghezza totale della corda. Come si vede dal grafico, la massima e la minima forza d'arco tendono a diventare uguali (*in alto a sinistra*) quando l'arco viene messo in un punto molto vicino al ponticello, mentre sono differenti quando l'arco si allontana da esso (*in basso a destra*). Lo spazio compreso tra questi due limiti, indicato in colore, rende conto dell'ampia tolleranza delle forze d'arco consentite. *Sul tasto* significa «arco sulla tastiera»; *sul ponticello* significa «arco vicino al ponticello». Il secondo gruppo di coordinate (*scala in basso*; *scala a destra*) suggerisce le condizioni normali per una tipica corda *la* di violoncello suonata alla velocità di 20 cm/s.

minima forza d'arco in funzione della distanza dell'arco dal ponticello espressa in centimetri come frazione della lunghezza totale della corda (*si veda la figura in basso in questa pagina*). Il risultato piú importante è che la massima e la minima forza d'arco sono uguali quando l'arco viene posto in un certo punto vicinissimo al ponticello, mentre sono differenti quando si allontana da tale posizione. È l'esistenza di questo spazio tra i limiti che fornisce alla forza d'arco l'ampia tolleranza che rende possibile suonare il violino.

Le forze verso sinistra tra queste rette sono praticamente troppo alte; il modo normale di suonare viene confinato all'area verso destra. Molto lontano dal ponticello il volume del suono è minimo, il contenuto delle armoniche superiori è minimo e il timbro presenta quella dolcezza che i compositori cercano scrivendo *sul tasto*, oppure «arco sulla tastiera». Al di là della massima forza d'arco il risultato non è musicale, mentre, appena al di sotto del minimo, si perde la piena nota fondamentale, producendo quella che è talvolta chiamata nota di superficie. Piú l'arco è vicino al ponticello, minore diventa il rapporto tra la forza d'arco massima e quella minima e piú ferma deve essere la mano del suonatore. Il suonatore esperto apprezza questa posizione che può creare note di alta qualità; il principiante trova prudente suonare piú vicino alla tastiera. Ancor piú vicino al ponticello la forza d'arco cresce in modo proibitivo e la pienezza della nota fondamentale scompare fino a ridursi a poco piú di un corteo di armoniche alte; questo è il suono irreale che il compositore indica con le parole *sul ponticello*. Nella regione che dà suoni normali il contenuto relativo di armoniche aumenta – la nota diventa piú brillante – sia mentre l'arco si sposta verso il ponticello sia mentre la forza d'arco aumenta verso il massimo.

Un siffatto diagramma deve essere considerato qualitativo, in special modo la curva della forza minima, che varia grandemente da nota a nota per la complessità della risposta della cassa armonica dello strumento. Sebbene la schematizzazione di Helmholtz sia abbastanza vicina alla realtà dei fatti da fornire una utile base per molti calcoli di prima approssimazione come quelli sopra descritti, essa non è totalmente credibile sotto altri aspetti. In contrasto con quanto essa predice, il contenuto delle armoniche aumenta con la forza d'arco, modificandosi cosí il timbro e l'intensità del suono. Se l'intensità del suono dipendesse solo dalla radice quadratica media della forza vibrazionale esercitata sul ponticello, l'effetto non sarebbe molto vistoso, ma quando le armoniche vengono emesse con maggiore intensità della nota fondamentale o vengono percepite dall'orecchio con maggiore sensibilità, l'effetto assume una certa importanza. Resta il fatto che i migliori mezzi che ha il suonatore per controllare il volume sono la velocità e la posizione dell'arco. La conclusione che la pressione sonora sia direttamente proporzionale alla velocità dell'arco e inversamente proporzionale alla distanza arco-ponticello non è lungi dall'essere vera.

Le note suonate con l'arco si possono produrre in modi diversi, ma forse nella maggior parte dei casi l'arco sospinge la corda lateralmente fin quando il suo spostamento non può piú essere sostenuto dall'attrito statico. La scomparsa dell'attrito, come la cessazione dello strappo, instaura due discontinuità di Helmholtz viaggianti in senso opposto, una sola delle quali, quella verso il ponticello, può diventare sostenuta. Fin quando la velocità dell'arco ha il predominio sulla forza d'arco, tuttavia, la condizione è descritta come «rauca» e ci possono essere molte false partenze prima che si raggiunga l'equilibrio. L'abilità all'inizio è di riuscire a ottenere l'equilibrio di un tempo cosí breve o a un livello sonoro cosí basso da evitare un effetto sgradevole. Un attacco silenzioso si può realizzare facendo in modo che l'arco già in moto faccia un «atterraggio morbido» sulla corda, entrando in tal modo nella regione di suono normale attraverso la regione denominata «modi superiori». Almeno in teoria, le forze d'arco e la velocità possono essere equilibrate sin dall'inizio.

Nella precedente trattazione della forza d'attrito tra l'arco e la corda è stato trascurato per semplicità un interessante fenomeno, cioè il ruolo delle «orecchie» della curva della forza di attrito nel creare tra l'arco e le estremità della corda delle riflessioni sonore alcune delle quali possono persistere per molti periodi di vibrazione. Questi effetti vengono ignorati nella trattazione classica del comportamento dell'arco, ma sono importanti negli oscillogrammi di velocità della corda. Si consideri una curva che rappresenta il moto della corda sotto l'azione dell'arco, quando durante il lungo intervallo di adesione ci si potrebbe aspettare che la corda segua la velocità costante dell'arco (*si veda la figura in questa pagina*). È infatti vero che non si ha scivolamento, ma, ciononostante, la corda può muoversi rotolando sull'arco con i limiti dovuti alla resistenza della corda alla torsione. L'increspatura nel rotolamento implica una corrispondente increspatura nella forza esercitata sulla corda.

Il termine «nota del lupo» viene comunemente usato per indicare un suono sgradevole che compare in modo cospicuo in corrispondenza a una certa frequenza negli strumenti a corde suonate con l'archetto. Spesso la sua origine è oscura. Esistono molte varietà di note del lupo, ma la piú dannosa della specie ha il suo habitat nel violoncello (e talvolta nel violino o nella viola) una ottava e qualche semitono al di sopra della nota piú bassa. L'origine di questa nota è chiara: la cassa di qualsiasi strumento ha una moltitudine di risonanze e la nota del lupo (se esiste) si forma in corrispondenza alla piú intensa di esse. Perché una corda suonata con l'arco si comporti nel modo piú opportuno le sue estremità devono essere fissate su un supporto la cui rigidità sia proporzionata alla massa della corda. Suonando una delle corde piú pesanti a una frequenza coincidente con quella di risonanza della cassa si favorisce perciò il disturbo, che si manifesta in modi differenti, il piú caratteristico dei quali è la produzione di due note, entrambe vibrazioni forzate, abbastanza vicine da generare uno stridente battimento. Poiché le due note sono poste a cavalcioni del picco di risonanza, esse richiedono una forza d'arco minore rispetto a una sola nota alla frequenza di risonanza (*si veda la figura in alto nella pagina seguente*).

Nelle rigide corde del piano, costituite da spessi fili di acciaio, le frequenze degli armonici superiori non sono esattamente multipli interi della frequenza del suono fondamentale, ma sono lievemente piú acute. Ciò non costituisce uno svantaggio: il lieve clangore che questo fatto dà al suono della corda colpita col martello è molto apprezzato. Quale effetto produce la rigidità su una corda suonata con l'arco? Chiaramente sarà diverso da quello del piano. Il meccanismo dell'archetto produce una successione di vibrazioni quasi identiche. Dal punto di vista matematico è un modo diverso per dire che la vibrazione è costituita da componenti armoniche le cui frequenze sono multipli interi esatti della frequenza piú bassa.

Vi può davvero essere un effetto sulla corda suonata con l'arco. Anche se viene limitata l'anarmonicità, si restringe il possibile campo di vibrazione. Ci si aspetta un deterioramento della qualità del suono per la riduzione delle armoniche superiori, per la difficoltà di intonazione e per la necessità di forze d'arco abnormi. Prima del 1700, quando divennero disponibili le corde arrotolate, tutte le corde di violino erano fatte di minugia, ma la corda di minugia *sol* (la piú bassa) era insoddisfacente e il motivo non è difficile da scoprire. Nel suonare con l'archetto la frequenza fondamentale è vicina a quella del piú basso modo di vibrazione naturale; nella corda *sol*, però, una frequenza sette volte maggiore di quella cade a metà strada tra il sesto e il settimo modo vibrazionale e si trova quindi completamente senza risonanza. Indipendentemente dalla forza d'arco, la settima armonica deve essere trascurabile. Questa difficoltà nella produzione delle armoniche può essere illustrata da una curva che mostra la velocità in corrispondenza

Il rotolamento della corda sotto l'azione dell'arco, durante un lungo intervallo di adesione, produce caratteristiche «increspature» nella curva di velocità della corda. Per ricavare questo oscillogramma la corda *la* di un violoncello venne sollecitata con una forza d'arco pari a 4,5 volte quella minima. Il periodo immediatamente successivo alla cattura della corda da parte dell'arco (la parte di curva subito a destra di ogni impulso principale) mostra principalmente il decadimento dell'impulso formato alla cattura quando si riflette nel tratto corto della corda. Il periodo precedente al rilascio mostra le riflessioni ritardate nel tratto lungo, dall'ultimo rilascio e dai precedenti.

«La nota del lupo», un suono sgradevole che può comparire intensamente a una particolare frequenza in uno strumento a corde suonate con l'archetto (specialmente nel violoncello), viene prodotto dai «battimenti» di due o piú note generate dalle vibrazioni «forzate» di una corda e addensate attorno alle frequenze naturali di risonanza della cassa armonica dello strumento. Questo oscillogramma, che illustra il moto di una corda per una nota del lupo complessa ottenuta dalla corda *do* di un violoncello, ci è stato dato da I. M. Forth e J. M. Buchanan dell'Università di S. Andrea in Scozia.

L'effetto della rigidità in una corda sollecitata con l'archetto è un deterioramento della qualità del suono dovuto in parte alla maggiore difficoltà di produrre armoniche superiori. Questo fatto è provato da questi tre oscillogrammi, che mostrano la velocità di una corda rigida per tre forze d'arco: minima (*in alto*), intermedia (*al centro*) e alta.

dell'arco in una corda rigida (*si veda la figura in basso in questa pagina*). Quando tale corda viene sollecitata con una forza d'arco minima, il suo comportamento non mostra quasi la minima rassomiglianza con quello di una corda flessibile.

Il lieve aumento di frequenza della n-esima armonica, prodotto dalla rigidità, è direttamente proporzionale al quadrato di n e a una quantità chiamata coefficiente di anarmonicità. Se si cambia una corda montata in una data posizione di un dato strumento, mantenendo costanti la lunghezza e la frequenza, l'intercambiabilità impone che venga mantenuta inalterata anche la tensione. Se consideriamo ora una serie di corde omogenee di materiali differenti, il coefficiente di anarmonicità risulta essere proporzionale al modulo di elasticità diviso per il quadrato della densità. Per l'acciaio questo rapporto è di circa il 50 per cento maggiore che per la minugia; per l'alluminio è quasi cinque volte maggiore che per la minugia. Per l'argento, invece, il rapporto è circa un terzo di quello per la minugia. Una corda di acciaio per piano che ha lo stesso suono della corda di acciaio *mi* di un violino ha un coefficiente di anarmonicità 20 volte maggiore. Se si trascurano le differenze di tensione tra le quattro corde di un violino (in effetti la tensione è nettamente maggiore per la corda alta che per le altre), l'anarmonicità di corde omogenee dello stesso materiale, essendo inversamente proporzionale alla quarta potenza della frequenza, aumenta di un fattore maggiore di 100 nel passare dalla corda piú alta alla piú bassa.

Da calcoli e misure eseguiti su parecchi tipi di corde in commercio, alcune delle quali arrotolate, si vede che, quando il coefficiente di anarmonicità è minore o uguale a 0,1, la rigidità non presenta svantaggi nell'uso dell'archetto. Nella corda di acciaio *mi* del violino il valore è di circa 0,04. Per una corda di violoncello *do* di ottima qualità, costituita da un avvolgimento metallico su un filo di acciaio, si ha all'incirca lo stesso valore.

Come accade per molte cose analoghe apparentemente semplici, vi è ancora molto da scoprire sulle corde sollecitate dall'archetto, probabilmente di scarso interesse per chi suona ma non per lo studioso di questi problemi. Per esempio, la torsione produce qualche importante effetto acustico? Che importanza ha la «resistenza negativa» nello scivolamento e come si comporta esattamente la resina? Di quanto differiscono i successivi periodi di vibrazione e questa leggera variazione ha qualche significato musicale?

« La nota del lupo », un suono sgradevole che può comparire intensamente a una particolare frequenza in uno strumento a corde suonate con l'archetto (specialmente nel violoncello), viene prodotto dai « battimenti » di due o piú note generate dalle vibrazioni « forzate » di una corda e addensate attorno alle frequenze naturali di risonanza della cassa armonica dello strumento. Questo oscillogramma, che illustra il moto di una corda per una nota del lupo complessa ottenuta dalla corda *do* di un violoncello, ci è stato dato da I. M. Forth e J. M. Buchanan dell'Università di S. Andrea in Scozia.

L'effetto della rigidità in una corda sollecitata con l'archetto è un deterioramento della qualità del suono dovuto in parte alla maggiore difficoltà di produrre armoniche superiori. Questo fatto è provato da questi tre oscillogrammi, che mostrano la velocità di una corda rigida per tre forze d'arco: minima (*in alto*), intermedia (*al centro*) e alta.

dell'arco in una corda rigida (*si veda la figura in basso in questa pagina*). Quando tale corda viene sollecitata con una forza d'arco minima, il suo comportamento non mostra quasi la minima rassomiglianza con quello di una corda flessibile.

Il lieve aumento di frequenza della *n*-esima armonica, prodotto dalla rigidità, è direttamente proporzionale al quadrato di *n* e a una quantità chiamata coefficiente di anarmonicità. Se si cambia una corda montata in una data posizione di un dato strumento, mantenendo costanti la lunghezza e la frequenza, l'intercambiabilità impone che venga mantenuta inalterata anche la tensione. Se consideriamo ora una serie di corde omogenee di materiali differenti, il coefficiente di anarmonicità risulta essere proporzionale al modulo di elasticità diviso per il quadrato della densità. Per l'acciaio questo rapporto è di circa il 50 per cento maggiore che per la minugia; per l'alluminio è quasi cinque volte maggiore che per la minugia. Per l'argento, invece, il rapporto è circa un terzo di quello per la minugia. Una corda di acciaio per piano che ha lo stesso suono della corda di acciaio *mi* di un violino ha un coefficiente di anarmonicità 20 volte maggiore. Se si trascurano le differenze di tensione tra le quattro corde di un violino (in effetti la tensione è nettamente maggiore per la corda alta che per le altre), l'anarmonicità di corde omogenee dello stesso materiale, essendo inversamente proporzionale alla quarta potenza della frequenza, aumenta di un fattore maggiore di 100 nel passare dalla corda piú alta alla piú bassa.

Da calcoli e misure eseguiti su parecchi tipi di corde in commercio, alcune delle quali arrotolate, si vede che, quando il coefficiente di anarmonicità è minore o uguale a 0,1, la rigidità non presenta svantaggi nell'uso dell'archetto. Nella corda di acciaio *mi* del violino il valore è di circa 0,04. Per una corda di violoncello *do* di ottima qualità, costituita da un avvolgimento metallico su un filo di acciaio, si ha all'incirca lo stesso valore.

Come accade per molte cose apparentemente semplici, vi è ancora molto da scoprire sulle corde sollecitate dall'archetto, probabilmente di scarso interesse per chi suona ma non per lo studioso di questi problemi. Per esempio, la torsione produce qualche importante effetto acustico? Che importanza ha la « resistenza negativa » nello scivolamento e come si comporta esattamente la resina? Di quanto differiscono i successivi periodi di vibrazione e questa leggera variazione ha qualche significato musicale?

GIOCHI MATEMATICI

di Martin Gardner

La base combinatoria dello « I Ching », il libro cinese della divinazione e della sapienza

Lo *I Ching*, o *Libro dei mutamenti*, è fra i libri piú antichi del mondo, e anche fra i piú enigmatici. Per piú di 2000 anni è stato usato in Oriente come un libro di divinazione ed è tuttora studiato con grande reverenza come una ricca fonte della sapienza confuciana e taoista. Decine di migliaia di giovani negli Stati Uniti (e particolarmente in California), attratti dall'attuale fortuna dell'occultismo e desiderosi di sapere qualcosa di piú sul misticismo orientale e sull'antica storia cinese, consultano lo *I Ching* con la stessa serietà con cui consultano la tavoletta « oui-ja », usata nelle sedute spiritiche per raccogliere i presunti messaggi dei trapassati, o i tarocchi. C.G. Jung era convinto della straordinaria proprietà dello *I Ching* di predire il futuro e lo interrogò addirittura sulle prospettive delle vendite in America di una nuova traduzione inglese dei suoi lavori, ottenendone una risposta ottimistica. Piú recentemente, occultisti di chiara fama – ad esempio Colin Wilson – hanno descritto le loro esperienze con la terrificante precisione oracolare dello *I Ching*.

La storia antica dello *I Ching* è sconosciuta. Esso fu probabilmente in origine, attorno all'VIII secolo a.C., una raccolta di testi di pronostici sorta in ambiente agricolo; questi documenti dovettero poi combinarsi lentamente nel corso dei secoli con pratiche divinatorie per mezzo di bastoncelli. Alcuni secoli prima di Cristo, verso la fine della dinastia Chou, lo *I Ching* acquistò la sua forma presente e divenne uno dei cinque grandi classici del canone confuciano.

La base combinatoria dello *I Ching* consta di 64 esagrammi, i quali presentano ogni possibile permutazione di due tipi di linee prese sei per volta. Ciascun esagramma ha un nome cinese tradizionale. I due tipi di linea ploclamano la dualità fondamentale della metafisica cinese: la linea spezzata corrisponde al « negativo » (*yin*), quella piena al « positivo » (*yang*). Considerando le linee due per volta, ci sono $2^2 = 4$ modi di combinarle nei cosiddetti digrammi, mentre esistono $2^3 = 8$ modi di formare trigrammi. I trigrammi con i loro nomi cinesi e i loro significati simbolici, sono presentati nella figura di pagina 93.

Esistono due modi tradizionali di disporre gli otto trigrammi in un cerchio. Il piú antico, noto come la disposizione di Fu-hsi dal mitico fondatore della prima dinastia cinese (la dinastia Hsia, 2205-1766 a.C.), è illustrato a sinistra nella figura in basso a pagina 94 e nella copertina di questo numero della rivista. Si osservi che le coppie opposte sono complementari, sia nel significato simbolico, sia nel senso matematico che ciascun trigramma è ottenuto da quello opposto sostituendo le linee yin con yang e viceversa. Questa disposizione, che di solito incornicia il simbolo familiare yin-yang, è ancora molto diffusa in tutta la Cina, in Giappone e in Corea come un amuleto di buon augurio da collocare sopra le porte e da usare come decorazione nei gioielli. Essa viene chiamata anche « cielo piú antico » o « disposizione primaria ». La disposizione del re Wen (dal padre leggendario del fondatore della dinastia Chou), riprodotta a destra nella figura in basso di pagina 94 (chiamata anche « cielo piú recente » o « disposizione del mondo interno »), abbandona le contrapposizioni complementari della sequenza di Fu-hsi, ed è tale che i trigrammi che si trovano in corrispondenza dei punti cardinali della bussola simboleggino le stagioni in ordine ciclico. Partendo dal sud (che è rappresentato tradizionalmente in alto) e procedendo in senso orario, i trigrammi posti in coincidenza con i punti cardinali indicano l'estate, l'autunno, l'inverno e la primavera.

La piú antica disposizione dei 64 esagrammi, nota come la sequenza del re Wen, corrisponde all'ordine in cui essi appaiono nello *I Ching* (*si veda la figura a pagina 92*). Le righe vanno da destra a sinistra, com'è indicato dalla numerazione. Si osservi che gli esagrammi sono accoppiati in un modo singolare. Ogni esagramma che ha un numero dispari è seguito da un esagramma che è il suo inverso o il suo complemento. Se l'esagramma dispari ha una simmetria bilaterale (ossia se rimane uguale capovolgendolo), l'esagramma successivo è a esso complementare, mentre se non ha una tale simmetria per produrre il successivo viene semplicemente capovolto.

La sequenza in cui le coppie di esagrammi si succedono l'una all'altra è determinata da una qualche sorta di ordine matematico? È questo un problema ancora insoluto. Di tanto in tanto qualche studioso dello *I Ching* annuncia la scoperta di uno schema matematico che starebbe alla base della disposizione delle coppie ma a un attento esame risulta che a tal fine sono state necessarie tante assunzioni che in realtà l'ordine stesso è stato assunto prima ancora che emergesse dall'analisi. A quanto si sa, le coppie della sequenza del re Wen sono in ordine casuale e non c'è alcuna base nota per determinare quale membro di una coppia debba precedere l'altro.

Solo nell'XI secolo i dotti cinesi scoprirono un modo semplicissimo ed elegante per ordinare gli esagrammi. Questa disposizione è attribuita a Fu-hsi (*si veda la figura a pagina 94 in alto*). La riga bianca in basso rappresenta il *t'ai-chi* (alla lettera « altissima vetta »), lo stato dell'universo quand'era « informe e vuoto » (cosí lo descrive la *Genesi* 1: 2). Questo caos indifferenziato si divide nella metà yin (in colore) e yang (in nero) della riga 1. Nella riga 2 vediamo che lo yin si divide in yin e yang, e lo stesso vale per lo yang. Queste divisioni binarie proseguono verso l'alto passando complessivamente per sei fasi.

Lo schema ci dà ora automaticamente tutti i poligrammi degli ordini da 1 a 6. Si dividano le righe 1 e 2 verticalmente in quattro parti uguali, si sostituisca in ogni parte il colore con linee spezzate (yin) e si avranno i quattro digrammi. Le righe 1, 2 e 3, divise verticalmente in otto parti uguali, ci danno gli otto trigrammi. Le righe 1, 2, 3 e 4, divise in 16 parti, ci danno i 16 tetragrammi; le righe 1, 2, 3, 4 e 5, divise in 32 parti, ci forniscono i 32 pentagrammi e le righe 1, 2, 3, 4, 5 e 6, divise in 64 parti, i 64 esagrammi.

La figura a pagina 95 illustra gli esagrammi nel loro ordine tradizionale

8	7	6	5	4	3	2	1
PI	SHIH	SUNG	HSÜ	MÊNG	CHUN	K'UN	CH'IEN
16	15	14	13	12	11	10	9
YÜ	CH'IEN	TA YU	T'UNG JEN	P'I	T'AI	LÜ	HSIAO CH'U
24	23	22	21	20	19	18	17
FU	PO	PI	SHIH HO	KUAN	LIN	KU	SUI
32	31	30	29	28	27	26	25
HÊNG	HSIEN	LI	K'AN	TA KUO	I	TA CH'U	WU WANG
40	39	38	37	36	35	34	33
HSIEH	CHIEN	K'UEI	CHIA JEN	MING I	CHIN	TA CHUANG	TUN
48	47	46	45	44	43	42	41
CHING	K'UN	SHÊNG	TS'UI	KOU	KUAI	I	SUN
56	55	54	53	52	51	50	49
LÜ	FÊNG	KUEI MEI	CHIEN	KÊN	CHÊN	TING	KO
64	63	62	61	60	59	58	57
WEI CHI	CHI CHI	HSIAO KUO	CHUNG FU	CHIEH	HUAN	TUI	SUN

La disposizione dei 64 esagrammi dello I Ching attribuita al re Wen.

di Fu-hsi, detto anche ordine « naturale ». Leggendoli da destra a sinistra, e andando dal basso verso l'alto, gli esagrammi corrispondono a quelli forniti dallo schema di Fu-hsi letto da sinistra a destra.

Possiamo ora capire perché Leibniz, che pensava di avere inventato il sistema binario verso la fine del seicento, fu così scosso quando sentí parlare per la prima volta della sequenza di Fu-hsi dal padre Joachim Bouvet, un gesuita missionario in Cina. Sostituendo lo 0 a ogni linea spezzata, considerando gli esagrammi in ordine, e leggendoli dal basso verso l'alto, si otterrà la sequenza 000000, 000001, 000010, 000011, ..., 111111, ossia nient'altro che l'elencazione dei numeri da 0 a 63 espressi in notazione binaria!

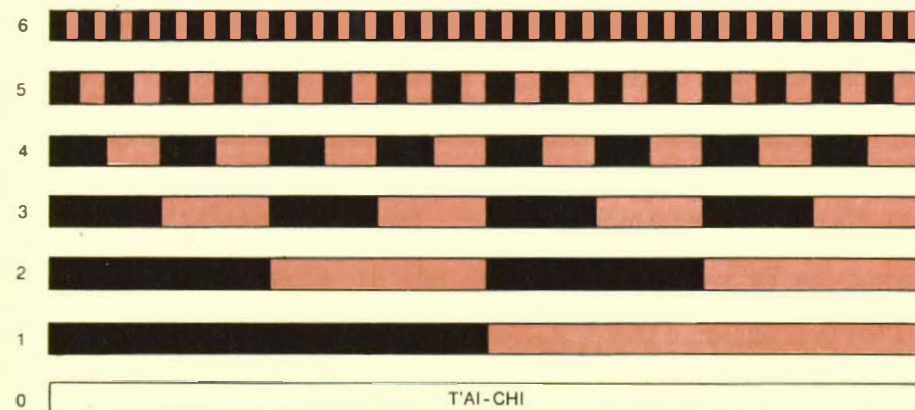
Sia Leibniz sia il padre Bouvet erano convinti che Fu-hsi avesse scoperto per ispirazione divina l'aritmetica binaria, ma a favore di quest'ipotesi non esiste la minima prova. Gli studiosi dello *I Ching* nell'XI secolo non avevano fatto altro che scoprire un modo naturale di ordinare gli esagrammi. Solo al tempo di Leibniz si riconobbe che la sequenza di Fu-hsi era isomorfa con un'utile notazione aritmetica.

Poiché le potenze del 2 si presentano continuamente in strutture matematiche e fisiche, non sorprende che i dotti cinesi siano stati in grado di applicare i 64 esagrammi a quasi tutto, dalle strutture dei cristalli al sistema solare e al cosmo. Z.D. Sung, nel suo divertente libriccino *The Symbols of Yi King* (The China Modern Education Company, Shanghai, 1943), racconta che un giorno stava facendo ruotare con le mani una scatola di fiammiferi (per simulare il moto della Terra nella sua rivoluzione attorno al Sole) quando d'improvviso gli venne in mente un modo naturale per generare gli otto trigrammi ai vertici di un cubo.

Supponiamo che le tre coordinate cartesiane di un cubo unitario, x, y, z, indichino la prima, la seconda e la terza cifra di un numero binario di tre cifre. Chiamiamo 000 il vertice che costituisce l'origine delle tre coordinate. Gli altri vertici vengono indicati con numeri binari di tre cifre da 0 a 7, dove lo 0 e l'1 indicano la distanza del singolo vertice dall'origine in ciascuna direzione delle coordinate. Gli otto numeri corrispondono, ovviamente, agli otto trigrammi, e i trigrammi complementari vengono a trovarsi ai vertici diametralmente opposti del cubo (*si veda la figura alla pagina 96*). Mettendo in atto un procedimento simile, i vertici di ipercubi unitari generano i poligrammi di ordine superiore. I 64 esagrammi corrispondono a numeri binari di sei cifre ai vertici di un ipercubo esadimensionale.

Invece di immergersi in dimensioni superiori, Sung divide il cubo in 64 cubi piú piccoli che identifica con i 64 « modi » del sillogismo classico. (La premessa maggiore, la premessa minore e la conclusione di un sillogismo possono assumere quattro forme diverse, dando cosí 64 modi possibili.) Sung non sapeva probabilmente che ciò era già stato fatto da C. Howard Hinton nel libro, edito nel 1904, *The Fourth Dimension* (pagg. 90-106). Hinton affronta in modo curioso l'iperspazio. Considerando le quattro « figure » di ciascun sillogismo (un'antica divisione fondata sull'ordinamento del soggetto, del predicato e del termine medio), egli ottiene 256 varietà, che identifica con le 256 cellette di un ipercubo di $4 \times 4 \times 4 \times 4$. Le cellette corrispondenti ai sillogismi tradizionalmente validi sono colorate in nero, dopo di che l'ipercubo viene proiettato in un normale cubo $4 \times 4 \times 4$. Si vede allora che le cellette nere sono disposte sim-

TRIGRAMMA	NOME	IMMAGINI	CARATTERI	RELAZIONI FAMILIARI	PARTI DEL CORPO	ANIMALI
	CH'IEN	CIELO FREDDO	FORTE DECISO CHIARO	PADRE	TESTA	CAVALLO
	K'UN	TERRA CALDO	DEBOLE REMISSIVO OSCURO	MADRE	VENTRE	BUE
	CHEN	TUONO PRIMAVERA	ATTIVO MOBILE STIMOLANTE	PRIMO FIGLIO	PIEDE	DRAGO
	K'AN	ACQUA LUNA INVERNO	PERICOLOSO DIFFICILE AVVOLGENTE	SECONDO FIGLIO	ORECCHIO	MAIALE
	KEN	MONTAGNA	QUIETO COCCIUTO IMMOBILE	FIGLIO MINORE	MANO	CANE
	SUN	VENTO BOSCO	GENTILE PENETRANTE FLESSIBILE	PRIMA FIGLIA	COSCIA	UCCELLO
	LI	FUOCO SOLE FULMINE ESTATE	BELLO DIPENDENTE CHE SI AGGRAPPA	SECONDA FIGLIA	OCCHIO	FAGIANO
	TUI	LAGO PALUDE PIOGGIA AUTUNNO	GIOIOSO SODDISFATTO CONTENTO DI SÉ	FIGLIA MINORE	BOCCA	PECORA

Gli otto trigrammi e alcuni loro significati.

In che modo sei divisioni yin-yang generano i 64 esagrammi.

metricamente attorno a un vertice del cubo, eccezion fatta per una sola celletta che dovrebbe essere nera mentre non lo è. Ciò condusse Hinton a scoprire che il sillogismo anomalo è valido nonostante tutto se si applica ai sillogismi un'interpretazione piú liberale, nella quale non soltanto il soggetto bensí anche il predicato venga qualificato.

Ma torniamo allo *I Ching*. Il libro (prescindendo dalle «dieci ali» aggiunte come appendici da metafisici confuciani) consiste essenzialmente nei 64 esagrammi, ciascuno dei quali è seguito da una breve spiegazione del simbolo e da sei glosse. Se si desidera usare il libro come un oracolo, bisogna scegliere a caso un esagramma e ciò dev'essere fatto in modo tale che le regole dicano come trasformare l'esagramma scelto in un secondo esagramma.

Il procedimento di scelta piú antico, ancora seguito da coloro che considerano con estrema serietà l'uso divinatorio dello *I Ching*, richiede 50 bastoncelli di achillea (detta anche millefoglio), lunghi ciascuno da 30 a 60 centimetri. Se non ci si possono procurare 50 steli di achillea, saranno utilizzabili 50 sottili bastoncini di legno. Essi dovrebbero essere messi in una scatola con coperchio, la quale dev'essere riposta, quando i bastoncini non vengono usati, in un luogo che sia non piú in basso delle spalle di un uomo. Lo *I Ching*, accuratamente avvolto in un tessuto di seta pulita, dev'essere tenuto accanto ai bastoncini.

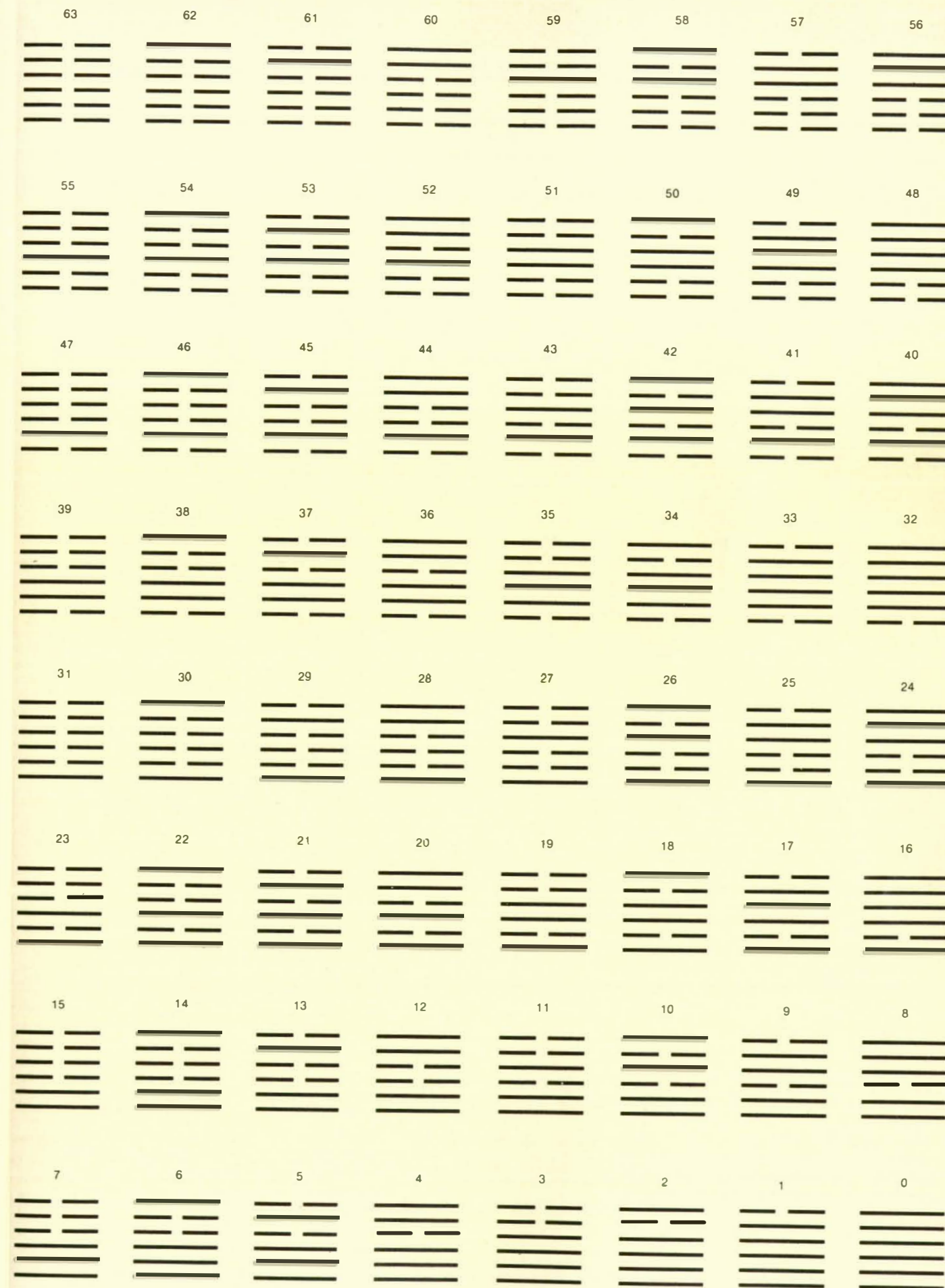
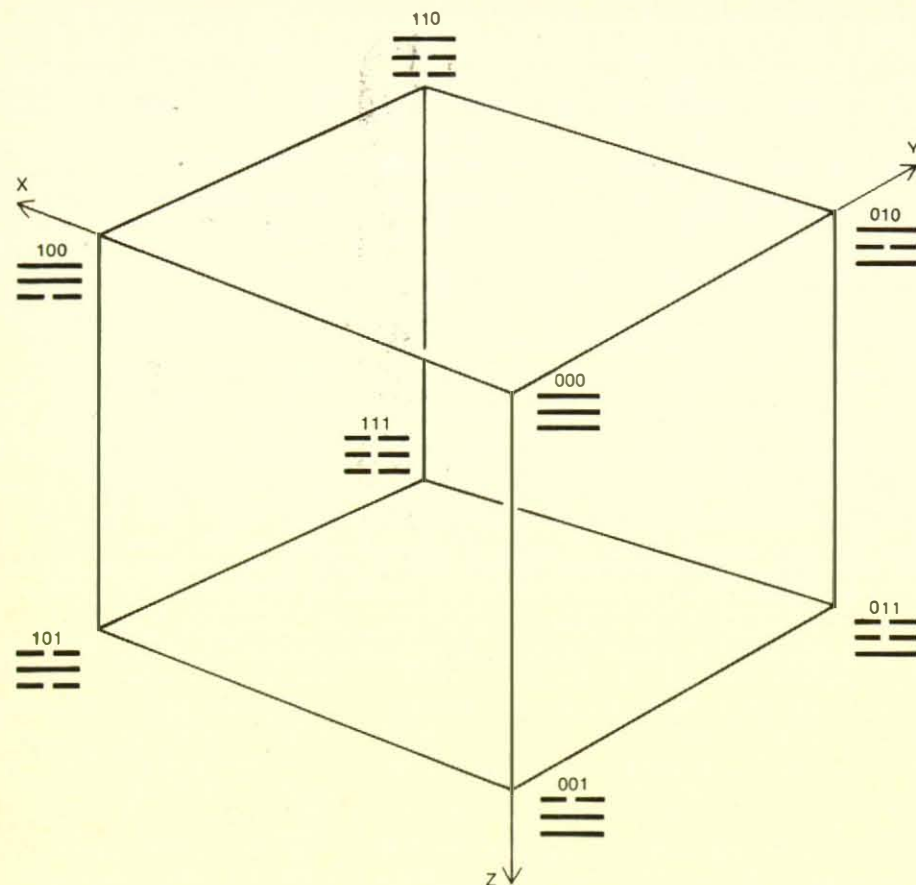
Il libro non dev'essere consultato alla leggera. Se gli si chiede qualcosa di frivolo o adottando un atteggiamento scettico, *I Ching* dà risposte frivole o insignificanti. Nel consultarlo si dovrebbe essere completamente rilassati, fisicamente e mentalmente. È essenziale, per tutta la durata della cerimonia, non pensare ad altro che alla domanda posta.

Supponiamo di voler porre una domanda allo *I Ching*. La prima cosa da fare sarà quella di svolgere la seta che protegge il libro, distenderla sul tavolo e collocarvi su il libro (in modo da proteggerlo dal contatto con superfici impure). Accanto al libro vengono collocati un bruciatore d'incenso e la scatola contenente i bastoncini. Volgendo le spalle al sud dobbiamo genufletterci e fare tre profondi inchini, toccando il suolo con la fronte; poi, stando ancora in ginocchio, dobbiamo passare per tre volte i 50 bastoncini attraverso il fumo dell'incenso, tenendoli orizzontalmente e muovendo la mano in cerchio in senso orario. Riponiamo quindi nella scatola un bastoncino; esso non avrà piú alcuna funzione nella cerimonia.

Collochiamo i 49 bastoncini sul tessuto e poi, con la mano destra, dividiamoli rapidamente, a caso, in due mucchietti. Chiamiamo il mucchietto di sinistra *A*, quello di destra *B*. Prendiamo un bastoncino da *B* e poniamolo tra l'anulare e il mignolo della mano sinistra. Con la mano destra rimuoviamo dal mucchietto *A* quattro bastoncini per volta finché ne rimangono 1, 2, 3, o 4. Poniamo questi bastoncini fra il medio e l'anulare della mano sinistra. Procediamo poi similmente nei confronti del mucchietto *B*, togliendone quattro bastoncini per volta finché ne rimarranno 1, 2, 3, o 4. Collochiamo questi bastoncini tra l'indice e il medio della mano sinistra. (Quest'ultima fase può essere abbreviata. Poiché la somma dei bastoncini restanti nei due mucchietti dev'essere 0, modulo 4, il numero dei bastoncini che rimangono nel secondo mucchietto può essere facilmente calcolato dal numero di quelli rimasti nel primo.) Nella nostra mano sinistra ci saranno ora cinque o nove bastoncini. (Le combinazioni possibili sono 1, 1, 3; 1, 2, 2; 1, 3, 1 e 1, 4, 4.) Eliminiamo definitivamente questi bastoncini.

Riuniamo i bastoncini restanti e ripetiamo con essi esattamente lo stesso procedimento di divisione, cominciando con la divisione casuale in due mucchietti. Alla fine, nella nostra mano sinistra ci saranno quattro o otto bastoncini. (Le combinazioni possibili sono 1, 1, 2; 1, 2, 1; 1, 3, 4 e 1, 4, 3.) Mettiamo via questi bastoncini e ripetiamo per la terza volta lo stesso procedimento di divisione nei confronti di quelli che ancora rimangono. Alla fine di questa terza selezione nella nostra mano sinistra ci saranno ancora quattro o otto bastoncini. Mettiamo via anche questi.

Il numero dei bastoncini che ancora rimangono sarà ora di 24, 28, 32 o 36. Dividiamoli in gruppi di quattro (ossia dividiamo il numero totale per 4): il quoziente sarà 6, 7, 8, o 9. Queste quattro cifre sono i numeri rituali che indicano il carattere della linea inferiore dell'esagramma. Se la cifra è pari (6 o 8), la linea è yin (spezzata); se è

La disposizione dei trigrammi attribuita a Fu-hsi (a sinistra) e quella attribuita al re Wen (a destra).

La sequenza di Fu-hsi, corrispondente a numeri binari da 0 a 63.

Trigrammi generati da un cubo.

dispari (7 o 9) la linea è yang (piena). Ma i numeri rituali ci dicono qualcosa di piú. I numeri 7 e 8 significano che la linea (sia essa yin o yang) è stabile e non può essere mutata. I numeri 6 e 9 indicano una linea « mobile », la quale (per ragioni che subito spieghiamo) può essere mutata nel suo opposto.

I 49 bastoncini vengono ora di nuovo raccolti insieme e l'intero rituale viene ripetuto per ottenere la seconda linea dal basso dell'esagramma. Altre quattro ripetizioni forniscono le quattro linee restanti. L'intera cerimonia, compiuta senza fretta, richiede circa 20 minuti.

Cerchiamo ora nello *I Ching* l'esagramma scelto e studiamone attentamente il testo che lo accompagna. Il testo risponderà alla nostra domanda e ci darà consiglio in riferimento alla situazione presente. Se tutt'e sei le linee dell'esagramma sono stabili, l'operazione è terminata. Se invece una o piú linee sono mobili, mutiamole nei loro opposti e consideriamo il nuovo esagramma. Il commento ci dirà che cosa possiamo attenderci in futuro seguendo i consigli del primo esagramma.

Dopo aver annotato l'esagramma o i due esagrammi e dopo aver letto e meditato i corrispondenti passi dello *I Ching*, dobbiamo accendere un altro bastoncino d'incenso, fare altre tre profonde genuflessioni di ringraziamento, rimettere i bastoncini nella loro scatola, riavvolgere lo *I Ching* nella seta e ricollocare poi il libro e i bastoncini nella loro posizione elevata.

Coloro che sono troppo pigri per compiere per intero l'antico rituale dei bastoncini possono usare un metodo di scelta piú semplice, che è stato popolare in Cina per vari secoli. Esso richiede tre monete identiche, preferibilmente monete cinesi antiche con fori quadrati. Esse dovrebbero essere tenute ben lustre e non dovrebbero mai essere tolte dalla loro scatola tranne quando si consulta lo *I Ching*. Osserviamo lo stesso rituale iniziale seguito per i bastoncini: genuflessioni, inchini, passaggio delle monete attraverso i fumi dell'incenso e cosí via. Si agitino le monete nelle due mani congiunte e poi le si lasci cadere simultaneamente sul tessuto di seta. Avendo previamente deciso quale faccia delle monete sia yin e quale yang, si consulti la tabella seguente per stabilire se il risultato ottenuto equivalga a 6, 7, 8 o 9.

Tre yin = 6 (una linea yin mobile).
Due yin, uno yang = 7 (linea yin stabile).
Due yang, uno yin = 8 (linea yang stabile).
Tre yang = 9 (linea yang mobile).

(Se si assegna il valore 2 alla faccia yin e il valore 3 alla faccia yang, la somma dei tre valori darà il numero rituale desiderato.)

Il calcolo delle probabilità fornite dai procedimenti dei bastoncini e delle monete rivela una sottile differenza tra i due metodi di divinazione. Per quanto concerne la scelta dell'esagramma iniziale i metodi sono virtualmente identici, mentre le probabilità sono diverse nella determinazione del secondo esagramma. Non è difficile dimostrare che in entrambi i procedimenti la probabilità di ottenere una linea spezzata in ciascuna delle sei fasi è di 1/2 ; si ha cioè la stessa probabilità di ottenere una linea spezzata o una linea piena. (Si suppone che ogni volta che i bastoncini sono divisi a caso in due mucchietti A e B e che A'è ridotto a uno, due, tre o quattro bastoncini, le probabilità siano uguali per ciascuno dei quattro casi. A rigore ciò non è del tutto vero, ma le deviazioni dall'uguaglianza sono cosí piccole da avere un effetto trascurabile sui risultati finali.) Lo stesso esagramma ha pertanto la stessa probabilità di ogni altro di essere scelto. I due procedimenti sono simili anche nel dare una probabilità di 1/4 che una determinata linea sia mobile. Sulle sei linee di un esagramma, 6/4, ossia 1 linea e mezzo in media sarà mobile.

Quando si usano le monete, la probabilità che una linea spezzata sia mobile è la stessa (1/4) che per una piena, e similmente si ha una probabilità di 3/4 che ciascun tipo di linea rimanga stabile. Quando invece si usano i bastoncini non è cosí. La probabilità che una linea spezzata sia mobile è di 1/16 rispetto ai 3/16 di una linea piena (ovvero si avranno rispettivamente le probabilità di 7/16 a 5/16 che tali linee risultino stabili). In altri termini, quando la scelta viene eseguita mediante i bastoncini, è tre volte piú probabile che sia mobile una linea piena che non una linea spezzata. È vero che ogni esagramma ha esattamente le stesse probabilità di qualsiasi altro di essere scelto per primo, ma quanto maggiore è il numero delle linee spezzate che un esagramma ha tanto maggiore è la probabilità che esso si ripresenti come secondo esagramma. I puristi che avanzano obiezioni alla scelta mediante monete dispongono di solidi argomenti matematici. Non soltanto il rituale dei bastoncini ha il merito di scoraggiare la consultazione frivola, ma la sua asimmetria produce un piú interessante insieme di probabilità. Non diremo nulla di corruzioni cosí empie come quelle consistenti nella pratica di ottenere i numeri rituali usando le serie di biglietti di banca, i numeri delle targhe di automobili, numeri telefonici, ecc.

Ai lettori che desiderino fare esperimenti di divinazione con lo *I Ching*, raccomando la traduzione tedesca di R. Wilhelm (*I Ching, das Buch der Wandlungen*, Jena 1924, rist. Düsseldorf, 1956); da tale versione deriva la traduzione inglese di C.F. Baynes, edita dalla Princeton University Press. Sono disponibili anche due buone traduzioni in edizione economica: di James Legge (Dover) e di John Blofeld (Dutton).

Il volume di Wilhelm e Baynes include la famosa prefazione di Jung in cui questi spiega il potere oracolare dello *I Ching* mediante la sua teoria della « sincronicità », una teoria difesa da Arthur Koestler nel suo recente volume *Le radici del caso* (Astrolabio-Ubaldini, 1973). Secondo Jung le predizioni dello *I Ching* e importanti avvenimenti che hanno luogo attualmente non sono legati da relazioni di causa ed effetto nel senso scientifico occidentale. Essi sono legati in modo « acausale » nel senso metafisico orientale di essere parti di un vasto piano cosmico che è oltre la portata della scienza ma è parzialmente accessibile all'inconscio della persona che procede alla selezione dei bastoncini. I 64 esagrammi e i loro significati sono archetipi jungiani, profondamente incisi nell'inconscio collettivo dell'umanità.

Gli scettici ostinati che vogliono sottoporre a prova lo *I Ching* si rendono conto immediatamente del perché il libro sembra funzionare. Il testo è cosí ambiguo che, quali che siano gli esagrammi scelti, è sempre possibile interpretarli in modo che sembrino avere attinenza con la domanda posta. Di fatto l'ambito dell'interpretazione intuitiva è cosí ampio che in Cina prima di Mao (non so quale sia la situazione oggi) esisteva una grande schiera di interpreti professionali dello *I Ching* i cui servigi erano disponibili su compenso agli angoli delle strade, alle fiere e ai mercati. Un motivo del successo della versione che ricorreva alle monete consisteva nel fatto che venivano massimizzati i profitti e rese piú celeri le predizioni.

E se le predizioni dello *I Ching* non si realizzano? Forse il testo non è stato interpretato in modo corretto, oppure chi ha gettato i bastoncini o le monete non era nella giusta disposizione d'animo. Inoltre il futuro non è determinato in modo assoluto. Lo *I Ching*, come le stelle dell'astrologia, non fa altro che indicare tendenze probabili.

Gli appassionati di occultismo che non hanno ancora consultato lo *I Ching* e che sono impazienti di accedere alla sua possente e misteriosa magia sono perciò messi in guardia. I consigli dati da questo antico libro possono essere psicologicamente molto piú dannosi di quelli degli astrologi, dei chiromanti e di coloro che vedono il futuro in un globo di cristallo o nelle foglioline di tè.

Gioco di Sim che si chiude con la mossa 15.

I Chomp vincenti.

La soluzione al problema di Sim pubblicato lo scorso mese consiste in un solo tracciato fondamentale (le varianti sono topologicamente identiche) che permette al gioco di svolgersi per 14 mosse senza che si abbia un triangolo monocromatico (*si veda l'illustrazione in questa pagina in alto*). I campi 4 × 5 e 4 × 6 del Chomp sono vinti da chi muove per primo (*si veda l'illustrazione in questa pagina in basso*).

David Gale che ha inventato il Chomp ha considerato il gioco su rettangoli infiniti. I lettori possono divertirsi a dimostrare (sulla base dei teoremi trattati il mese scorso) che il primo giocatore vince su campi n × infinito (ammesso che n non sia uguale a 2) e su quadrati infinito × infinito, mentre perde su campi 2 × infinito.

È stata pubblicata una nuova edizione di 500 pagine del volume citato il mese scorso *The Guide to Simulations/Games for Education and Training* e si può richiederla a: Information Resource, Inc., P.O. Box 417, Lexington, Mass. 02173, USA.